

絵画における色彩美の数理的分析の研究

小林 光夫

絵画における色彩美の数理的分析の研究

小林光夫

1999年11月

東京大学大学院工学系研究科

亡き父母に捧ぐ

究極の現代の思想の文庫

究極の思想

究極の思想

究極の思想

目次

1	序章	1
1.1	研究の位置づけ	1
1.2	論文の構成	2
2	表色系と色空間	4
2.1	人間の色覚	4
2.2	表色系	5
2.3	均等色空間	8
2.4	画像入出力装置を用いる際の色値変換	12
2.5	色彩分析に適する色空間の選択について	15
3	色彩分析のための代表色抽出法	17
3.1	画像と色分布	17
3.2	代表色画像	22
3.3	代表色抽出のアルゴリズム	27
3.4	代表色抽出における実用上の問題	32
4	絵画の色彩的特徴と色分布	36
4.1	分析の対象とする絵画作品とその色彩的特徴	36
4.2	絵画の色分布にみられる典型的な配色構造	46
4.3	データソースにかかわる問題	54
5	色分布の類似性に基づく絵画の分類	55
5.1	色分布間の類似度の定め方に関する問題	55
5.2	離散分布間の距離	58
5.3	絵画作品の階層的クラスタ分析	63
5.4	作品群間の類似度分析	73
5.5	色分布の類似性に基づく画像検索について	76
5.6	まとめ	77
6	色空間における配色構造の分析	78
6.1	色分布と配色楕円体	78
6.2	配色楕円体の中心位置による分析	85
6.3	配色楕円体の大きさによる分析	86
6.4	配色楕円体の形による分析	89

6.5	配色楕円体の向きによる分析	95
6.6	まとめ	101
7	画面上の色彩構成に関する分析	102
7.1	色の配置と色彩構成楕円	102
7.2	色彩構成楕円の大きさによる分析	107
7.3	色彩構成楕円の形と向きによる分析	111
7.4	まとめ	113
8	終章	114
8.1	各章の要約	114
8.2	今後の課題と展望	115
	謝辞	116
	参考文献	117

1 序章

1.1 研究の位置づけ

絵画や服飾や建築、あるいは自然や都市の景観は、しばしばわれわれに美感をもたらす。美は、歴史や文化に深く根ざしてはいるが、万人に共通の普遍的かつ客観的な側面もあるであろう。このような美に関わる科学的・哲学的な探究は、アリストテレス以来人を魅了する永遠のテーマとなっている。

Martin Kemp は、著名な著書 "The Science of Art — Optical themes in western art from Brunelleschi to Seurat"[1]の中で、古来より美術にとり入れられている科学・技術を分析し解説している。また John Gage は、最近の著書 "Colour and Meaning — Art, Science, and Symbolism"[2]の中で、とくに美術作品を例に色彩に関する美学と科学の関連を論じている。このような芸術と科学を結ぶ研究の流れは、"colour" を仲立ちとする "interaction between art and science", あるいは "reconciliation between art and science" の標語のもとに、昨今の諸学会で取り上げられている。急速な科学技術の進展と人間の精神や自然環境との間に生じる歪が露わになりつつある今日、両極を結ぶこのような試みは重要な意味をもつであろう。

さて、芸術と科学を結ぶ従来の美学的な研究方法に対し、科学的な研究方法として、種々の美的心象ないし美的事象から美の構造（たとえば黄金分割、遠近法など）を抽出する数理的な立場からの研究や、美を感じる心のシステムを black box とみて、その構造を種々の入力データに対する人間の応答の分析から推測する心理的な立場からの研究がある。

形態美に対する Birkhoff の美度計算 [3] やそれを色彩美に適用した P.Moon と D.E.Spencer の色彩調和論 [4, 5, 6] は、前者に位置する研究といえよう。この種の研究は、数学や計算機による精密な情報処理の不可能な時代に行なわれたものであり、今日ではその成果の真偽が心理実験の対象として問われるにすぎない。

後者に位置する研究としては、簡単な配色パターンを入力とし、"美しさ"、"快適さ"などの心理量を計測し、主成分分析など多変量解析の手法により構造を見出す研究（たとえば佐川他 [7]、Hård と Sivik [8, 9]）も多い。この場合は、入力および出力を記述するための変数群の選択が心的過程を表現するのに適切かが問題である。また、入力とする配色パターンが適切か（簡単なパターンが実際のゲシュタルトを説明し得るか）も問題となる。

本論文の目的は、絵画作品を対象に、色彩のもつ美しさの法則性を探ることにある。そして、数学的な概念構成・論理思考により、科学的・客観的な探究の方法論を生み出すことにある。

文芸や音楽における美の分析については、それぞれ文字をもって書かれたテキストや音符をもって書かれた楽譜など、デジタル情報を対象とし、計量的な分析手法が適用可能である。しかるに、絵画芸術においては、画布に書かれたアナログ情報が対象であり、J.Locke のいう第一の質である形態情報に関してはまだしも、第二の質とされる色彩情報に関しては、

客観的な記号化がなし得るか否かさえ不明である。

筆者はこれまで、P.Moon や D.E.Spencer らと同じ立場から、ただし現代の精密な情報処理手法を駆使して、絵画やデザイン画など視覚芸術の色彩的特徴を抽出する研究を行なってきた [10, 11, 12, 13 など]。美の source としては、古今の masterpieces をとりあげているが、その理由は、それらが多くの人々の価値観に支えられ鑑賞・保存されてきたという事実があるからである。

もとより、美感をおよぼすのは単に色の組合せだけでなく、形態、材質、構図などさまざまな要素があること、また、美感に結びつくか否かの心理学的な検討が不可欠であることは言うまでもないが、まずは色彩美を対象に、美に関与するであろう客観情報を抽出することが、研究の第一歩である。

筆者は、絵画画像のもつ膨大な数の構成色を、まず少数の離散的な代表色で表わすことから始め、その3次元色空間における分布＝色分布および2次元画面上の配置＝色配置に着目し、この2軸から色彩に関わる意味論を展開することにした。

本論文は、筆者のほぼ10年間にわたる研究の成果をもとに、概念を整理し、少なくとも数々の絵画作品を対象として、新たに計算を行った結果を示すものである。

この成果は、従来人間の感性のみにより明らかにされてきた美学上の諸概念に裏付けを与えるであろうし、さらに新しい知見をもたらすであろう。また、色彩教育や色彩計画などの実用の場においても、従来経験則のみに基づいた指導原理や計画原則を裏付け、あるいは正し、さらには新しい方策を与えるであろう。

1.2 論文の構成

本論文は全8章からなる。

第1章では、研究の意義、位置づけ、目的、および本論文の構成について述べる。

第2章と第3章は、以後の章における分析に必須の、数学的基本概念の提示の章である。

第2章では、まず色を定量的に扱うための体系である表色系、および数学的な取り扱いを容易にするための色空間について述べる。本論文では、標準の表色系・色空間として著名な CIE (国際照明委員会) の体系を扱う。とくに、色の似ている似ていないなど色の差を議論するために、色空間におけるユークリッド距離が色の感覚的な差に対応する「均等色空間」を採用する。つぎに、多量の画像を計算機処理する際に、現時点では必須となる入出力時の色値変換の方法について述べる。さいごに、色彩分析に適する色空間について検討を行なう。

第3章では、まず、画像、画面、色空間、色分布などに関する数学的な定義を行なう。つぎに、画像に含まれる多数の色から、余分な情報を捨象し、数少ない色からなる代表色画像を得るアルゴリズムを述べる。もとの画像の色を代表色で置き換えたときに、その偏差を最小にすることを目的とした「逐次クラスタ分割法」を提案する。さいごに、代表色画像を得る際の色数の決定など、実用上の問題を検討する。

第4章では、まず、この章を含め以降で共通して分析の対象とする絵画作品 (10 画家, 183 作品) を紹介し、その色彩的特徴を簡潔に述べる。つぎに、いくつかの絵画作品を例に、その色分布に、実用の場で使われる種々の配色形式＝配色構造が見られることを示す。ここに見られる配色構造は、原画像の色分布においては、過多の情報に隠されており、代表色抽出を経てはじめて見えるものである。さいごに、データソースにかかわる問題にふれる。

第5章では、色分布の類似性に基づき、絵画をその色彩的特徴に応じて分類する方法を示す。有限個の代表色からなる色分布は、分布密度をもたない離散分布である。まず、このような離散色分布の類似度を定める方法として、色空間を格子状に分割（量子化）し、各分割区間に含まれる色の重みで構成されるベクトルを比較する方法や、Gauss 関数を用いて離散分布を連続化し、連続的な分布密度関数の差によって類似度を定める方法を取りあげ、これらの方法に内在する問題点を述べる。つぎに、離散分布を直接比較し、分布間の距離を定義する方法を示す。二つの離散分布の対応を、線形計画法の一つである輸送問題とみなすことにより、最小費用流が距離を与えることがわかる。こうして得られた、(距離の公理を満たす)離散分布間の距離は、色分布に限らず多方面への利用が可能である。

この章の後半では、得られた離散分布間の距離の応用として、画像の色分布の類似度による分類の実例を示す。第一の応用は、いわゆる階層的クラスタ分析である。3人の画家 Caravaggio, M.Utrillo, および F.Marc の作品 50 点について FN 法を適用したところ、きわめて良好な分類結果が得られた。階層的クラスタ分析では、初期のクラスタ分割から始めて、近隣関係にあるクラスタを逐次統合するアルゴリズムを用いるが、このアルゴリズムにはクラスタを再構成するフィードバック機構がないため、多量のデータの分類にはむかない。そこで、データの最近隣関係を用いて適切な初期クラスタを形成する改良 FN 法 (ND-FN 法) を考案した。10 画家の 183 作品に適用したところ、やはり良好な結果を得た。このことについてもふれる。第二の応用は、10 画家それぞれの作品群の間の類似度分析である。群間距離と群内距離を計算し、作品群間の近隣関係を分析したところ興味深い結果を得た。この章の最後で、画像の類似度と画像検索の問題について検討を加える。

第6章では、色分布を代表する統計量と配色構造との関連を調べる。3次元色空間における色分布の位置、大きさ、形状を、分布の平均および分散共分散行列の固有値、固有ベクトルといった統計量で代表することにする。これらの統計量を色空間における偏差楕円体—配色楕円体と呼ぶ—で表わし、配色楕円体と配色構造との対応をみる。配色楕円体の中心位置は絵全体の色彩的印象に、大きさはコントラストの大小に、形や向きは配色構造の複雑さや種類に対応するであろう。これらの諸量により、10 画家の 183 作品中から典型的な配色構造をもつ作品を選別する。また、各画家の作品群ごとに、配色構造上の特徴を述べる。

第7章では、3次元色空間における色分布から転じて、2次元画面における色分布、すなわち色の配置と画面上の色彩構成について論じる。3次元の分布を代表する統計量を偏差楕円体で表わしたのと同様に、2次元の色配置を代表する統計量（平均および分散共分散行列の固有値と固有ベクトル）を偏差楕円体—色配置楕円体と呼ぶ—で表わす。画像を構成する各代表色ごとの色配置楕円体の配置は、画面全体における色彩構成の特徴を表わす。そこで、色配置楕円体の中心の配置を、さらに新たな偏差楕円体—色彩構成楕円体—で表わし、色彩構成楕円体の大きさ、形、向きにより、10 画家の全 183 作品から典型的な色彩構成をもつ画像を選別する。また、これらの諸量により各画家ごとに作品群の特徴をみる。

第8章では、この研究の成果についてまとめを行ない、今後の課題と展望を述べる。研究の成果は、ひとことで述べるならば、これまで未知の分野であった2次元視覚芸術にかかわる色彩美の計量的分析の方法論を示したことにある。色彩画像を構成するデジタルでない多次元情報に対し、客観的なアプローチがなしうることを、実例をもって示した。

2 表色系と色空間

人間の感覚ないし知覚としての色を科学的に扱う学問が色彩科学である。色彩科学の基礎は20世紀前半にほぼ確立されたとみてよい。しかし、数学と計算機を用いた精密な情報処理が可能となった今日、幾多の実験的事実から推定され蓄積された概念を整理し、論理の再構成を計る必要がある。この章では、色彩画像の数理的な扱いを可能にするために、必要最小限の基礎概念を、できるかぎり厳密にかつ簡潔にまとめる。専門用語や諸データは、信頼できる文献[14, 15, 16, 17など]によった。

2.1 人間の色覚

色は、目に入った光(可視放射)がもたらす感覚あるいは知覚である。目に入った光は、網膜にある視細胞によって電気信号に変換され、神経を伝わり、脳で処理されて、“色”として知覚される。

視細胞は、その解剖学的形態により、錐体(cone)と桿体(rod)の二種に分けられる。このうち色覚に関与するのは錐体であり、網膜の中心部に集中して分布する。明所で働き、光に対する分光感度の異なるもの三種がある。最大感度をもたらす波長の長・中・短に応じてそれぞれL錐体、M錐体、S錐体と呼ばれる。各錐体の推定された分光感度 \bar{l} , \bar{m} , \bar{s} の例を、図2.1に示す[18, 19, 20]。

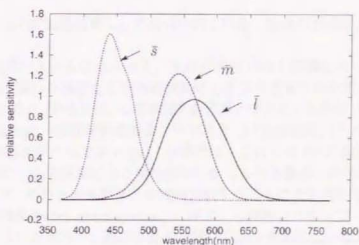


図 2.1: 三錐体の分光感度

光に対する三種の錐体の応答を、基本三刺激値という。基本三刺激値は、後続する神経回路網により、明・暗、赤・緑、青・黄の三種の反対色信号に変換され、脳に伝達される。反対色信号をもとに、明度（明暗の度合）、彩度（色みの強さ）、色相（色の種別）といった色の三属性や、さらには、寒暖、軽重、膨張・収縮、進出・後退などの高次の色知覚および種々の色彩感情が得られる（図 2.2）。

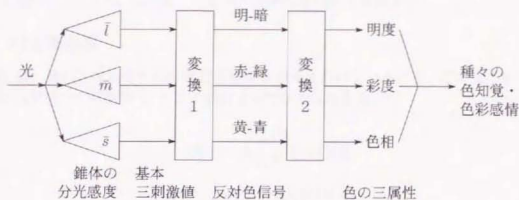


図 2.2: 人間の色覚情報の処理過程

2.2 表色系

色を定量的に表わすことを表色といい、表色のための体系を表色系 (color specification system) という。

(1) 表色系の種類

表色系は、種々のものが国際標準として用いられている。表色の方式により、二種に大別される。

一つは、人間の視覚システムにならって、光の分光分布から計算によって色を定める方法である。光の混色に関わる綿密な心理物理実験にもとづき考案されたゆえ、混色系 (color mixing system) と呼ばれる。あるいは、心理物理的表色系と呼ぶこともある。CIE (Commission Internationale d'Éclairage, 国際照明委員会) の定めた XYZ 表色系、 $L^*u^*v^*$ 表色系、 $L^*a^*b^*$ 表色系など一連の表色系がそれである [21]。日本では、これらは JIS に規定がある [22, 23]。

もう一方の表色法に、心理評定により属性値のわかっている数多くの色票 (color chip) を系統的に配列しておき、それと対象物体とを視感比較することにより色を定める方法がある。この種の表色系を色票系 (color order system) と呼ぶ。心理評定にもとづくことから、心理的表色系と呼んでもよいであろう。色のみえを比較して色を定めることから、顕色系 (color appearance system) と呼ぶことも多い。代表的なものに、Munsell 色票系¹ [24]、NCS (Natural

¹ Munsell 色票系は、1905 年、画家 A.H.Munsell によって発表され、その後 OSA (Optical Society of America, 米国光学会) により改良された色票系である。日本・アメリカを中心に広く実用されている。

Color System) 色票系² [25], PCCS(Practical Color-Coordinate System) 色票系³ [26]がある。

表色系 $\left\{ \begin{array}{l} \text{心理物理的 (CIE による XYZ 表色系, } L^*u^*v^* \text{ 表色系, } L^*a^*b^* \text{ 表色系など)} \\ \text{心理的 (Munsell 色票系, NCS 色票系, PCCS 色票系など)} \end{array} \right.$

色票系は、色票集と適当な照明光源だけあれば使えることから、実用性が高い。一方、CIE の定めた心理物理的表色系は、光の分光分布から計算のみによって色が定まるので、計算機を用いた情報処理に向いている。本論文の色彩分析では、すべて CIE の心理物理的表色系で色を扱うことにする。以下に、CIE の代表的な表色系を解説する。

(2) XYZ 表色系

CIE は、光のエネルギーの分光分布密度 ϕ が与えられているとき、この光のもたらす色は次に示す三つの実数値 X, Y, Z の組によって定められるとした。

$$\begin{aligned} X &= k \int_A \bar{x}(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda, \\ Y &= k \int_A \bar{y}(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda, \\ Z &= k \int_A \bar{z}(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (2.1)$$

ここに、 $A \subset (0, \infty)$ は可視波長域 (有界閉区間)、 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ は台 A をもつ非負値関数、 $k > 0$ は定数である。可視波長域は、 $A = [380, 780]$ あるいは $A = [400, 700]$ (単位はいずれも nm) とすることが多い。 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ は、等色関数と呼ばれ、心理物理実験により定められたものである (図 2.3)。

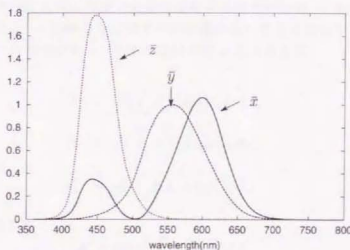


図 2.3: 等色関数 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$

² NCS は、1972-73 年にスウェーデン工業規格 (SIS) として受け入れられた色票系である。ヘリングの反対色理論に基礎をおき、人間の色知覚の心理的計量により構成された。近年西欧を中心に広まりつつある。

³ PCCS は、1964 年に (財) 日本色彩研究所が発表した色票系である。色彩計画、色彩調査、色彩教育など実用を目標とし、色彩調論の立場から考案された。日本の初等色彩教育の場でよく使われている。

Y の値は放射 ϕ の与える測光量に比例する。ふつうは、Y の値が放射 ϕ の測光量に一致するように、 k の値を定める。(たとえば、Y の単位を cd/m^2 、 $\phi(\lambda)d\lambda$ の単位を W とするとき、 $k = 683 \text{ cd}/\text{m}^2/\text{W}$ 。)

X, Y, Z は、XYZ三刺激値あるいは単に三刺激値と呼ばれ、錐体の出力である基本三刺激値に対応する(同じでない)。とくに、Y 値は、光のもたらす明るさ感覚に相関することに注意する。

この XYZ三刺激値で色を表わすシステムを XYZ表色系あるいは CIEXYZ 表色系という。X, Y, Z から、放射の強さに依存しない色みを表わす量として色度 (chromaticity)

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (2.2)$$

を計算することができる。 $x+y+z=1$ であるから独立した量は二つである。独立した量としてふつうは x と y を採用し、(X, Y, Z) のかわりに 測光量 Y と色度 x, y を組にして (Y, x, y) で色を表わすことも多い。このような色の表わし方を Y_{xy} 表色系と呼ぶ。なお、色度 x, y のことをとくに xy 色度という。

(3) 光源色と物体色

信号機やネオンサインの色など、光の色—光源色という—を考えるときは、色の絶対的な明るさに意味があるものとし、ふつう X, Y, Z の単位を cd/m^2 とする (X, Y, Z) あるいは (Y, x, y) で色を表わす。しかし、たいていの場合、色は物に付随した属性であるかのように知覚される。このような色—物体色という—を考えるときは、色の絶対的な明るさにはあまり意味がない。たとえば、照明の強さを変えると、白い紙の絶対的な明るさは変わるが、“白”であることは変わらない。そこで、物体色を規定するには、前項の X, Y, Z 値そのものではなく、光をどの方向にも同じ輝度で完全に反射する理想的な面—完全拡散反射面(ふつう白の感覚を与える)—の明るさに対する相対値をもって色を表わす。すなわち、照明光のエネルギーの分光分布密度を s 、物体の反射率を ρ とするとき、

$$\begin{aligned} X &= K \int_A \bar{x}(\lambda) \rho(\lambda) s(\lambda) d\lambda, \\ Y &= K \int_A \bar{y}(\lambda) \rho(\lambda) s(\lambda) d\lambda, \\ Z &= K \int_A \bar{z}(\lambda) \rho(\lambda) s(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2.3)$$

で物体色を表わす。ここに

$$K = 100 / \int_A \bar{y}(\lambda) s(\lambda) d\lambda$$

とおいた。この X, Y, Z も XYZ三刺激値あるいは単に三刺激値と呼ぶ。ただし、X, Y, Z の単位は % であることに注意する。Y 値は、物体の白に対する相対的な反射率を意味するので、視感反射率と呼ばれる。

物体色を XYZ 三刺激値で表わすとき、やはり XYZ 表色系あるいは CIEXYZ 表色系と呼ぶ。物体色の XYZ 三刺激値から、前述の式 (2.2) により色度 x, y, z を計算し、視感反射率 Y と色度 x, y との組 (Y, x, y) で色を表わすことも多い。この場合も、やはり (物体色の) Yxy 表色系という。

物体色を定めるための照明光として、A 光、C 光、および D_{65} 光と呼ばれる 3 種の光 — 標準の光という — がよく使われる。A 光は電球の光、C 光は昼光、 D_{65} 光は紫外部の放射を含む昼光 (6500°K の黒体放射の近似) を意図して定められた分光分布密度をもっており、いずれも CIE および JIS[27] で規定されている (図 2.4 参照)。

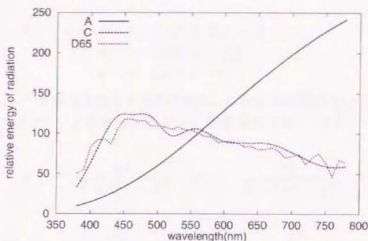


図 2.4: A, C, D_{65} 光の分光分布密度

2.3 均等色空間

前節で見たように、色は、光源色、物体色を問わず、 (X, Y, Z) ないし (Y, x, y) のように実数値の三つ組で表わせる。3次元ユークリッド空間内に適当な座標系をとり、色を表わす実数値の三つ組をこの空間内の一点に対応させるとき、この空間を色空間と呼ぶ。たとえば、直交座標 (X, Y, Z) ないし (Y, x, y) をとるとき、それぞれ XYZ 色空間ないし Yxy 色空間と呼ぶ。あるいは、それぞれ CIEXYZ 色空間ないし CIE Yxy 色空間と呼ぶ。

ところで、色空間内の 2 点間のユークリッド距離は、二つの色の間の隔たりを表わすが、XYZ 色空間あるいは Yxy 色空間におけるそれは、必ずしも二つの色の差に対する人間の感覚量には比例しない。

色空間における 2 点間のユークリッド距離が、人間の感覚的な色の差 — これを色差 (color difference) と呼ぶ — に比例する色空間を、均等色空間 (uniform color space) と呼ぶ。

色差が意味をもつ計算、たとえば 3 章に述べる代表色による色の近似など、を行なう場合には、色空間として均等色空間を選ばなければならない。

CIE は、物体色に対し、XYZ 色空間から以下に示す変換によって得られる二つの均等色空間 $L^*a^*b^*$ 色空間および $L^*u^*v^*$ 色空間を定めた。

(1) $L^*u^*v^*$ 色空間

与えられた照明光下における対象物の三刺激値を (X, Y, Z) ，“白”とみなす物体 — 参照白 (reference white) という — の三刺激値を (X_n, Y_n, Z_n) とする。また、関数 $f: [0, \infty) \rightarrow \mathbf{R}$ を

$$f(\xi) = \begin{cases} \xi^{1/3}, & \xi > \xi_0 \\ 7.787\xi + 16/116, & \xi \leq \xi_0 \end{cases} \quad (2.4)$$
$$\xi_0 = 0.008856$$

のように定める。

このとき、変換

$$\begin{aligned} L^* &= 116f(Y/Y_n) - 16, \\ u^* &= 13L^*(u' - u'_n), \\ v^* &= 13L^*(v' - v'_n) \end{aligned} \quad (2.5)$$

により定まる L^*, u^*, v^* を直交座標とする色空間を、 $L^*u^*v^*$ 色空間あるいは CIELUV 色空間という。また、 (L^*, u^*, v^*) による表色系を $L^*u^*v^*$ 表色系という。ここに、 u', v' および u'_n, v'_n は、それぞれ

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}, \quad v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (2.6)$$

および

$$u'_n = \frac{4X_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n}, \quad v'_n = \frac{9Y_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n} \quad (2.7)$$

で定義される。 u', v' および u'_n, v'_n は、それぞれ対象物および参照白の $u'v'$ 色度と呼ばれる。

(2) $L^*a^*b^*$ 色空間

$L^*u^*v^*$ 色空間と同様、対象物の三刺激値を (X, Y, Z) ，参照白の三刺激値を (X_n, Y_n, Z_n) とし、関数 f を式 2.4 で定めるものとする。

このとき、変換

$$\begin{aligned} L^* &= 116f(Y/Y_n) - 16, \\ a^* &= 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)], \\ b^* &= 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)]. \end{aligned} \quad (2.8)$$

により定まる L^*, a^*, b^* を直交座標とする色空間を、 $L^*a^*b^*$ 色空間あるいは CIELAB 色空間という。また、 (L^*, a^*, b^*) による表色系を $L^*a^*b^*$ 表色系という。

$L^*u^*v^*$ 色空間および $L^*a^*b^*$ 色空間の双方において、 L^* は明度を表わし、0が黒に、100が白に対応する。 u^* あるいは a^* は赤-緑反対色の度合を表わし、負の値が緑みに、正の値が赤みに、0が赤みも緑みもない状態に対応する。 v^* あるいは b^* は黄-青反対色の度合を表わし、負の値が青みに、正の値が黄みに、0が黄みも青みもない状態に対応する。 u^* および v^* が

ともに0のとき、あるいは a^* および b^* がともに0のときは無彩色である。

(3) L^*C^*h 表色系

$L^*u^*v^*$ 色空間においては、直交座標値 (u^*, v^*) に対し、変換

$$\begin{aligned} C_{uv}^* &= \sqrt{u^{*2} + v^{*2}}, \\ h_{uv} &= \tan^{-1}(v^*/u^*) \end{aligned} \quad (2.9)$$

により、極座標値 (C_{uv}^*, h_{uv}) を計算することができる (図 2.5)。 C_{uv}^* は彩度に、 h_{uv} は色相に、それぞれ相関する量である。それぞれ uv -彩度 (uv -クロマ)、 uv -色相角と呼ばれる。

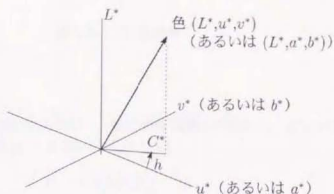


図 2.5: $L^*u^*v^*$ 表色系 (あるいは $L^*a^*b^*$ 表色系) と L^*C^*h 表色系

$L^*a^*b^*$ 色空間においても、同様に

$$\begin{aligned} C_{ab}^* &= \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}, \\ h_{ab} &= \tan^{-1}(b^*/a^*) \end{aligned} \quad (2.10)$$

により、 ab -彩度 (ab -クロマ) C_{ab}^* および ab -色相角 h_{ab} を計算することができる。

(L^*, u^*, v^*) や (L^*, a^*, b^*) のかわりに (L^*, C_{uv}^*, h_{uv}) や (L^*, C_{ab}^*, h_{ab}) を使って表色するとき、 L^*C^*h 表色系という。もとの色空間が文脈によりわかっているときは、 C^* や h の添字は書かないことも多い。また、 uv -彩度や ab -彩度を単に彩度と呼び、 uv -色相角や ab -色相角を単に色相角と呼ぶこともある。ただし、“明度”、“彩度”、“色相”の語は、通常人間の色知覚の属性を述べるときに使うので、厳密な言い方をするときは、 X, Y, Z から計算によって得られる量に対して‘メトリック’の辞を頭に付けて、たとえば L^* はメトリック明度、 C^* はメトリック彩度のように呼ぶ。

CIE 関連の表色系の系譜を、2.1 節の色覚システムにならって図式化し、図 2.6 に示す。

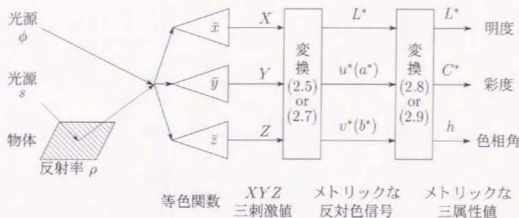


図 2.6: CIE 表色系

(4) 明度関数

対象物の明度と視感反射率との関係は、一般に明度関数と呼ばれる。 $L^*u^*v^*$ 色空間および $L^*a^*b^*$ 色空間においては、式 (2.5) あるいは式 (2.8) の

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16$$

が明度関数を表わす。ここで、関数 f_L を

$$f_L(\xi) = \frac{1}{100} [116f(\xi) - 16] = \begin{cases} 1.16\xi^{1/3} - 0.16, & \xi > \xi_0 \\ 9.03292\xi, & \xi \leq \xi_0 \end{cases} \quad (2.11)$$

と定義すれば、 L^* と Y との関係は

$$L^* = 100f_L(Y/Y_n) \quad (2.12)$$

のように簡単な形に書ける。

$f_L(\xi)$ は、図 2.7 に示すように、 ξ が 0 から 1 に増加するにつれ 0 から 1 に増加する上に凸の関数となる。 $f_L(0.2) \approx 0.5$ であるから、視感反射率が 20% の物体は、およそ明度が 50% (中くらいの明るさの灰色) の明るさ感覚を与えることがわかる。

なお、 $L^*a^*b^*$ 色空間における色度 a^* および b^* は、 f_L を使えばそれぞれ

$$\begin{aligned} a^* &= 431.0345[f_L(X/X_n) - f_L(Y/Y_n)], \\ b^* &= 172.4138[f_L(Y/Y_n) - f_L(Z/Z_n)] \end{aligned} \quad (2.13)$$

と書ける。また、 $10f_L(Y/Y_n)$ は、Munsell 色票系の明度 (0 が黒、10 が白) をよく近似する。

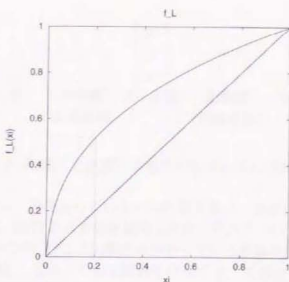


図 2.7: f_L のグラフ

2.4 画像入出力装置を用いる際の色値変換

多量の絵画画像に対し色彩分析を行なうには、計算機による画像処理が不可欠である。計算機への画像の入力にはデジタルカメラやカラーレスキャナが、出力には CRT やカラープリンタが、通常用いられる。これらの装置における画像の色は、微小画素ごとにいわれる RGB 値という実数値の三つ組で扱われることが多い。ところが、これらの RGB 値は、一般には標準化されておらず機械依存である。

画像を計算機に取り込んで色彩分析を正しく行なうためには、入力装置の出力である機械依存の色値から機械独立の表色系の色値に変換する必要がある。また、画像を出力し観察して、分析結果などを確認するためには、機械独立の色値から出力装置の入力となる機械依存の色値に変換する必要がある。

機械依存の色値と機械独立な色値との間の色値変換技法は、種々考察されているが [28, 17]、本論文で用いている方法を、以下に概説する。

(1) 入力時における色値変換

入力装置の出力結果である RGB 値から CIE の表色系の色値への変換が正しく行なわれるためには、RGB 値と XYZ 三刺激値との間に Luther 条件 [17, p.37] と呼ばれる 1:1 対応がなければならない。ふつう入力装置は、この条件をほぼ満たすように作られている。そこで、以下、機械独立の表色系として XYZ 表色系を仮定する。

三刺激値が (X, Y, Z) である対象を計算機に取り込んだとき、その RGB 値が (R, G, B) であったとする。 (X, Y, Z) から (R, G, B) へのこの変換 f が 1:1 対応であるとするれば、得られた (R, G, B) からもとの色 (X, Y, Z) を知るには、 f の逆変換 f^{-1} を (R, G, B) に作用させればよい (図 2.8)。



図 2.8: 画像入力装置による色の取り込みと色値変換

写像 f は機種に依存し、公開されていないのが常である。筆者は、画像入力装置として、Canon 製複写機 (PIXEL-JET) の入力部を使用した。それについても、特性 f は未公開であった。そこで、あらかじめ XYZ 三刺激値の分かっている多数の色票を計算機に取り込み、対応する RGB 値を記録し、これらの対応関係を使って f^{-1} を推定する。じっさい、照明光を C 光としたときの XYZ 値が既値であり信頼性もある JIS の標準色票 [29] を用い、 f^{-1} として R, G, B の 2 次多項式を最小二乗法 (線形回帰) で推定した。

(2) 出力時における色値変換

出力時における色値変換は、入力時に比べいくぶん複雑である。出力装置の出せる色の範囲 — 色域 (gamut) — は通常限られており、われわれが扱う色すべてをそのまま出すことができない。そのため、標準の表色系の色値を、機械依存の色値へ変換する前に、まず色域内の色値に変換するという前処理 — 色域調整 (gamut mapping) — が必要となるのである。

1) 色域調整

色域調整の技法については、たとえば文献 [30] に詳しい。以下に本論文で用いている技法を簡単に述べる。

出力装置の色域は、ふつう明度方向も彩度方向も限られている。この場合、人間は彩度方向の変化には鈍感であることを考慮し、次のような色域調整のアルゴリズムが考えられる。

出力すべき色は、 L^*C^*h 表色系で表わされているものとする。まず、色相角 h および彩度 C^* を保ったまま、明度 L^* を、できるだけ明度変化を保ちながら変更し、色域内に収まる明度 L'^* を得る。たとえば、明度が L'_{\min} から L'_{\max} まで ($0 \leq L'_{\min} < L'_{\max} \leq 100$) の範囲しか再現できない場合、図 2.9 に示すような S 字曲線を用いた変換により L'^* を得る。

このとき、S 字曲線の最も急な傾斜を 1 より若干大きめにしておくと、見た目にはちょうど傾き 1 のように (すなわち正しい明暗変化となるように) 感じられることが知られている [30]。本論文では、S 字曲線を L^* の 3 次関数の合成で表わし、最大傾斜を 1.15 とした。

つぎに、彩度 C^* の調整を行なう。色相角 h 方向の彩度の限界が $C^*_{\max} (> 0)$ であるとき、 $C^* > C^*_{\max}$ であるならば、 C^* を変更し、 $C'^* = C^*_{\max}$ とする。 $C^* \leq C^*_{\max}$ である色については何もしない。この変換を行なうと彩度が C^*_{\max} を越える色の彩度はすべて同一の彩度 C^*_{\max} になる。したがって、高彩度の色の変化が再現できないが、全体的に彩度を調整すると、かえって平均彩度の低下が目立つので、このような方法をとった。

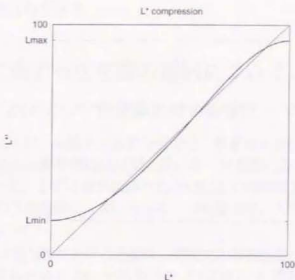


図 2.9: 明度の調整

ii) 機械独立の色値から機械依存の色値への変換

出力装置から出すべき(色域調整ずみの)色が XYZ 値で表わされているものとし、この色を正しく出すべく RGB 値を求める方法は、(1) 項で述べた入力時における色値変換とほぼ同様である。

今、 (R, G, B) を与えたとき出力される色が (X, Y, Z) であるとし、この変換 g が 1:1 対応であるとする。このとき、色値 (X, Y, Z) をもつ色を出力するために出力装置に与える RGB 値は、 g の逆変換 g^{-1} を (X, Y, Z) に作用させたものとなる(図 2.10)。

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} & \xrightarrow{g^{-1}} & \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} & \xrightarrow{g} & \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \\
 \text{逆変換} & & \text{RGB 値} & & \text{出力装置} \\
 \text{(色値変換)} & & & & \text{による変換}
 \end{array}$$

図 2.10: 画像出力装置による色の出力と色値変換

変換 g は、じっさいは 3 種ないし 4 種の色材の非線型混色により実現されるので、入力時の変換 f のような単純な性質が期待できない。そこであらかじめ、系統的に与えた RGB 値に対する出力色票の XYZ 値を測色し、 g を表わす 3 次元の対応表(LUT, look up table)を作成しておく。逆変換 g^{-1} は、与えられた XYZ 値に対してこの表を探索することにより実現する。

筆者は、画像出力装置として OKI 製レーザープリンタ(MICROLINE 8cv)を使用し、上記の技法により本論文のカラー図版すべてを出力している。なお、対応表 g を作成するための測色は、C 光を照明光として行なったので、出力結果はいずれも C 光下で観察したとき望

みの色となるように想定されている。

2.5 色彩分析に適する色空間の選択について

(1) $L^*u^*v^*$ 色空間および $L^*a^*b^*$ 色空間に対する検討

2.2節(1)項でふれたように、本論文の色彩分析では、計算機を用いた処理に適しているという理由で、CIEの定めた心理物理的色空間を用いる。計算機に取り込んだ画像の色値は、客観的な扱いをするために、まずは前節に述べた手法により機械独立の色空間 XYZ の色値に変換する。しかし、 XYZ 色空間は、次に述べる二つの理由で、人間の感覚・知覚に基づいた色彩の分析には向かない。

第一に、物体色の XYZ 色空間における色値は、照明光の影響を含んでいる。たとえば、無彩感覚を与える完全拡散反射面の D_{65} 照明光下の XYZ 値と A 照明光下の XYZ 値は異なる。われわれが分析対象としたのは、物体固有のものとして知覚される色であるから、照明光に依存しない色値をとる色空間を用いなければならない。

第二に、人間の色彩感覚や色彩知覚にもとづく分析には、似ている色似ていない色など、色の知覚的な差すなわち色差が重要な意味をもっている。したがって、色空間におけるユークリッド距離が色差に比例する均等色空間を用いる必要がある。

CIEの均等色空間としては、 $L^*u^*v^*$ 色空間および $L^*a^*b^*$ 色空間が考えられる。 $L^*u^*v^*$ 色空間は、 $L^*a^*b^*$ 色空間より若干均等性がよい。一方、 $L^*a^*b^*$ 色空間は、 $L^*u^*v^*$ 色空間に比べ中明度において Munsell 色票系をよりよく近似する。

$L^*u^*v^*$ 色空間にせよ $L^*a^*b^*$ 色空間にせよ、色値は参照白に対して相対化されているから、これらの色空間で色を論ずるときにはすでに照明光の影響は除かれていると考えてよい⁴。

$L^*u^*v^*$ 色空間の u^*, v^* は、 u^*v^* 色度と明度 L^* との積からできている。 u^*v^* 色度は、式(2.6)からわかるように三刺激値 X, Y, Z から射影変換により得られ、光の加算に対してある種の線形性を保持するなど、わかりやすい性質を備えている。それに対し $L^*a^*b^*$ 表色系の a^*, b^* は、光の加算に対する線形性は保持せず、色値の意味の解釈が難しい。そこで、本論文の分析では最終 $L^*u^*v^*$ 色空間で色を扱うことにする。

もちろん、 $L^*u^*v^*$ 色空間や $L^*a^*b^*$ 色空間も完全なものではない。照明光による順応をより反映し、人間の色知覚をより近似する表色系・色空間が提案されている。たとえば、納谷色空間[31, 32]、Hunt 色空間[33]、CIECAM97s[34]などがそれである。しかし、これらは視環境に依存するパラメータが多く複雑であり、現時点の色彩分析にそれらの色空間を使わねばならぬほど精密さが要求されるとは考えられない。

さらに、本論文における色彩分析では、単独の色を扱うことはなく、画像を構成する色の組を扱う。このような場合には、色の相互の関係が重要であり、色空間の違いはそれほど大きい影響を与えない。じっさい、いく種類かの色彩分析を $L^*u^*v^*$ 色空間と $L^*a^*b^*$ 色空間の両方を用いて行なった経験では、結論にほとんど差異は出なかった(たとえば文献[10, 11]を参照)。

⁴ 実利的な色彩情報処理では、ほとんどの場合機械依存の色空間—たとえば画像入力装置の出力である RGB 値による色空間など—で色が扱われている。このような色空間での色彩分析においては、照明光の変化に対して不変—色彩恒常(color constancy)—の情報扱うために、特別の配慮が必要となる。

(2) 心理的表色系による分析

前項では $L^*u^*v^*$ 色空間採用の理由を述べたが、心理的表色系である Munsell 色票系や NCS 色票系による分析の必要がないわけではない。とくに、日本やアメリカでは、Munsell 色票系が色彩設計、色彩教育の場で多用されている。ヨーロッパでは、綿密な心理実験をもとに設計された NCS 色票系の利用が、発祥の地であるスウェーデンのみならず、北欧から南欧まで、勢いを増しつつある。また、日本では、とくに配色計画の便を意図して作られた PCCS 色票系 [26] が、やはり色彩教育の場で広く使われている。

これらの色票系は、表色値から色を想起しやすいこと、配色の便が図られていることなど、CIE の表色系に比し人間向きである。とくに、NCS 色票系では、色を Munsell 表色系のように色相・明度・彩度の三属性で表わすのではなく、白み・黒み・色み⁵ および色相という別の属性で表わしており、これらの属性値のほうが色彩分析や配色計画などで重要な役割をはたすとも考えられる。したがって、これらの色票系による色彩分析も大きな意味をもちうるのである。

現状では、心理的表色系と心理物理的表色系との関係は、特定の視環境における色値の対応が、数表によってのみ与えられているにすぎない。筆者は、補間および関数近似の手法を用いて、CIEXYZ といくつかの色票系間の色値変換プログラムを開発し [35, 36, 37]、それらの色票系における色彩分析を試みつつある [38, 39, 40, 41 など]。

心理的表色系は、必ずしも均等色空間を構成しないので、画像の代表色抽出においては均等色空間を使わざるを得ない。心理的表色系による色彩分析は、本論文に示すような均等色空間における分析の次にくるべきものである。

(3) よりよい色空間の構築へ向けて

色彩分析に適した色空間とは、CIE の色空間のように光の分光分布から色値が計算でき、種々の視環境に適合し、かつ人間の心理にもあったものであろう。

筆者は、よりよい色空間の構築を目標に、現行の CIE 表色系の誕生の経緯を見なおす作業をすすめるとともに、心理物理的表色系に NCS のような白み・黒み・色みの概念を導入することを試みている。文献 [42] は、現行の測色学・測光学に数学的基礎づけを与えるものである。文献 [18, 19] は、等色関数と基本分光感度の関係を数学的矛盾のないように正す試みである。文献 [43] は、均等色空間に白み・黒み・色みの概念を導入する試みである。

⁵ 白み・黒みの概念は無彩色においては明暗の概念と一致するが、有彩色においては異なる。たとえば、鮮やかな黄色は白と同程度に明るい、白みも黒みも非常に少なく色みがほとんどである。

3 色彩分析のための代表色抽出法

計算機に取り込まれた画像は、ノイズも含め、ふつう数万色～数十万色の色から構成される。しかし、われわれが認識する色、すなわち分析の対象とする色は、細かい差異は捨象した、せいぜい数十色であろう。そこで、画像の色彩分析を行なうにあたっては、前処理として数多くの色から代表となる色を選出し、色数が少なくかつ原画の情報を損なうことも少ない代表色画像を作成する必要がある。こうして得られた代表色画像が、以後の色彩分析の対象となるわけである。

この章では、画像や色分布の概念構成から始めて代表色抽出のアルゴリズムに至るまでを、数学的に展開する。さいごに、実用上の問題について検討する。

3.1 画像と色分布

(1) 画像のモデル

本論文では、画像を、画面上のほとんどの点に対し色空間内の色を対応させる写像と考える。画面を2次元ユークリッド空間の有界領域 $A \subset \mathbb{R}^2$ 、色空間を一般に3次元ユークリッド空間 \mathbb{R}^3 とすれば、画像は、区分的連続¹な写像

$$f: A \rightarrow \mathbb{R}^3,$$

あるいは、画面 A を定義域とする区分的連続な部分写像

$$f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3, \\ \text{dom } f = A$$

で表わせる(図3.1)。

画面は、簡単のため、矩形領域

$$A = (0, a^1) \times (0, a^2) \quad (a^1, a^2 > 0)$$

にとることが多い。

画面上の任意の点集合 $U \subset A$ に対して、その“面積”すなわちルベグ測度を考えることができる。これを $|U|$ と書く。たとえば、上の矩形画面 A に対しては、

$$|A| = a^1 \times a^2. \quad (\text{全面積})$$

¹ 定義域内の有限個の点および有限個の曲線上で関数値が未定義であってもよいが、他では有界かつ連続であること。

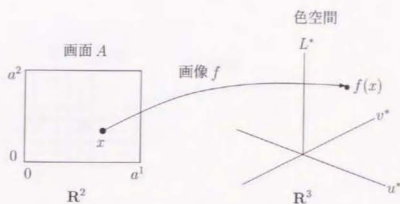


図 3.1: 画像と画面と色空間

画面上の点 $x \in A$ の色は (存在するならば), $f(x) \in \mathbb{R}^3$ で与えられる.

画像を構成する色を, 画像の構成色と呼ぶ. 画像 $f: A \rightarrow \mathbb{R}^3$ のすべての構成色からなる集合

$$f(A) = \{f(x) \in \mathbb{R}^3 \mid x \in A\}$$

を構成色集合という. 構成色集合は, f の値域でもある:

$$f(A) = \text{ran} f.$$

(2) 離散画像

計算機などで画像を扱うときには, 画面は 2次元格子状に分割された微小な矩形 — 画素 (pixel) — の集まりとなる. このような画面を離散画面と呼ぶ. 離散画面をもつ画像を離散画像という. 離散画像では, 一つの画素の色は同一とする. 離散画像に対し, 前項に述べた 2次元ユークリッド空間の有界領域を画面とする画像を連続画像と呼ぶことにする. (写像が連続なのではないことに注意する.)

各画素を整数値の対で表わせば, これらの集合 $M \subset \mathbb{Z}^2$ で全画素, すなわち離散画面を表わすことができる. したがって, 離散画面が M である離散画像 f は, 写像

$$f: M \rightarrow \mathbb{R}^3,$$

あるいは部分写像

$$\begin{aligned} f: \mathbb{Z}^2 &\rightarrow \mathbb{R}^3, \\ \text{dom} f &= M \end{aligned}$$

で表わせる (図 3.2).

離散画像 f の画素 $i \in M$ の色 $f(i)$ は f_i のように書くこともある.

矩形の離散画面は, ヨコ, タテの分割数をそれぞれ $m^1, m^2 (\geq 1)$ とすれば,

$$M = \{1, 2, \dots, m^1\} \times \{1, 2, \dots, m^2\}$$

で表わせる.

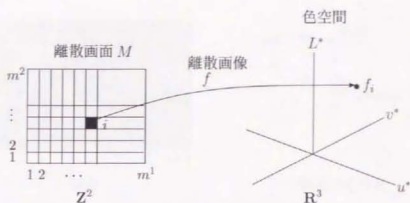


図 3.2: 離散画像と離散画面と色空間

画素集合 $I \subset M$ に対して、その面積に相当する画素数（すなわち計数測度）を考えることができる。これを $\#I$ と書く。たとえば、上の離散画面 M に対しては

$$\#M = m^1 \times m^2. \quad (\text{全画素数})$$

画素集合 $I \subset M$ が表わす画面上の部分が画面全体に対して占める相対面積は

$$\#I / \#M$$

で表わせる。

離散画像 $f: M \rightarrow \mathbf{R}^3$ の構成色数は有限である:

$$\#f(M) \leq \#M. \quad (\text{全構成色数} \leq \text{全画素数})$$

(3) 色分布の定義

連続画像 $f: A \rightarrow \mathbf{R}^3$ の全構成色集合を $B = f(A)$ とするとき、色集合 $V \subset B$ に属する色をもつ画面上の点集合を

$$f^{-1}(V) = \{x \in A \mid f(x) \in V\}$$

と書く。 $(f^{-1}$ は逆像を表わし、逆写像ではない。) また、 $V \subset B$ に属する色が画面上に占める面積の全画面の面積に対する相対値（相対面積、重み）を

$$w(V) = |f^{-1}(V)| / |A|$$

で表わす。とくに、 V が一つの色 y のみからなる単元集合 $V = \{y\}$ のとき、

$$w(\{y\}) = w(y)$$

のように略記する。

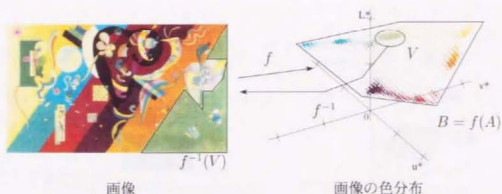


図 3.3: 画像と色分布

離散画像 $f: M \rightarrow \mathbf{R}^3$ に対しても, 上記と同様に, 色集合 $V \subset B = f(M)$ に対し,

$$f^{-1}(V) = \{i \in M \mid f_i \in V\},$$

$$w(V) = \#f^{-1}(V)/\#M$$

と定義する.

連続画像, 離散画像を問わず, 画像の全構成色集合 B に対し

$$w(B) = 1$$

となる.

画像の構成色が(画面のどこに配置されているかは無視して)“画面上のどのくらいの面積を占めているか”を, 画像の(色空間における)色分布(color distribution)と呼ぶ. 色分布は, 連続画像, 離散画像を問わず, \mathbf{R}^3 上の分布関数

$$G(V) = w(V \cap B) \quad (\forall V \subset \mathbf{R}^3)$$

で表わせる.

(4) 色分布の形状

連続画像 $f: A \rightarrow \mathbf{R}^3$ においては, 画面 A を有限個の領域およびその境界に分割し, 各領域上で f が連続であるようにできる. そのような領域の一つを U とすれば, U の像

$$f(U) = \{f(x) \in \mathbf{R}^3 \mid x \in U\}$$

は, 一般に \mathbf{R}^3 内の曲面をなす. 特別な場合は, 点や曲線になることもある. (図 3.4 参照.)

a) 同一色 $f(U)$ がただ 1 点からなるとき, U 上の色はすべて同一である. このような色を同一色と呼ぶ. 同一色は色空間内では孤立点で表わされる. したがって, 有限個しかない. 同一色 y に対しては $w(y) = |U|/|A| > 0$ である.

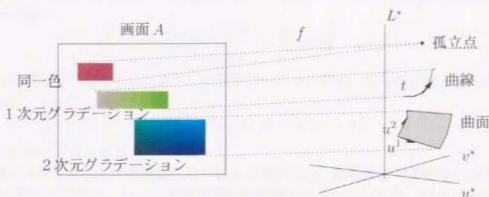


図 3.4: 領域の色

$f(U)$ が曲線または曲面をなす場合は、 U 上の色は連続的に変わる。すなわグラデーションをなす。この場合、 $y \in f(U)$ に対しては $w(y) = 0$ である。しかし、次に示すように、 $V \subset f(U)$ ($V \neq \emptyset$) に対して $w(V)$ は存在する。

b) 1次元グラデーション $f(U)$ が曲線をなす場合、 U 上の色は1次元グラデーションをなすという。曲線 $f(U)$ 上の1次元座標を t 、線素を dt とすると、 $\forall V \subset f(U)$ に対し

$$w(V) = \int_V g_1(t) dt$$

となるほとんど連続な非負関数 g_1 が存在する。

c) 2次元グラデーション $f(U)$ が曲面をなす場合、 U 上の色は2次元グラデーションをなすという。この場合、曲面 $f(U)$ 上の2次元座標を u 、面素を du とすれば、 $\forall V \subset f(U)$ に対し

$$w(V) = \int_V g_2(u) du$$

となるほとんど連続な非負関数 g_2 が存在する。

これより、一般の色分布は、離散分布である同一色の色分布、および連続分布である1次元や2次元のグラデーションの色分布の線形結合で表わせることがわかる。

離散画像 $f: M \rightarrow \mathbb{R}^3$ の構成色は有限個であるから、すべて同一色である。その構成色集合を

$$B = f(A) = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$$

とし、各構成色の重みを

$$w_i = w(y_i), i = 1, 2, \dots, n$$

とすれば、色分布 G は

$$G(\{y\}) = \begin{cases} w_i, & y_i (i = 1, 2, \dots, n) \text{ のとき} \\ 0, & \text{その他} \end{cases}$$

によって定義される離散分布となる。この分布は、3次元 δ 分布 (δ 超関数) を用いて、分布密度の形で

$$g(y) = \frac{dG(y)}{dy} = \sum_{i=1}^n w_i \delta(y - y_i)$$

のように表わすこともある。また、分布関数のグラフの形、すなわち色とその重みの組の集合として、

$$G = \{(y_i, w_i) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$$

のように表わすこともある。

画像をスキャナなどで計算機に取り込んだ場合には、離散画面の画素数は通常非常に多い(数万~数百万)から、いかに構成色集合が有限であるといっても、色分布の形状は連続画像の色分布の形状に近くなる。ただし、取り込みの際のノイズなどの影響もあり、一般には雲状のぼやけた形状となる。すなわち、1次元グラデーションに対応する色分布は曲線状に並んだ色点の集まりとなるし、2次元グラデーションに対応する色分布は曲面状に広がる色点の集まりになる。また、同一色に対応する色分布は、一点に集積する色点の集まりとなる。(図3.3に示した色分布は、じつは計算機に取り込んだ離散画像の色分布である。)

3.2 代表色画像

画像を構成する数多くの色の中で、似ている色を一つの色 — 代表色 — で置き換え、色数の少ない代表色画像を作ることを考える。このとき“似ている色”は人間の知覚にもとづき選択する必要がある。したがって、色空間は、均等色空間でなければならないことに注意する。

(1) 代表色画像の定義

画像の構成色集合を、いくつかの部分集合すなわちクラスタに分割し、各クラスタに属する色を一つの色で置き換え、新たな画像を作ることを考える。このとき、置き換える色を代表色、新たに作られた画像を代表色画像という。

連続画像 $f: A \rightarrow \mathbf{R}^3$ の構成色集合 $B = f(A)$ のクラスタ分割

$$B = (B_1, B_2, \dots, B_K)$$

が与えられたとする。ここに、

$$B = \bigcup_{k=1}^K B_k,$$

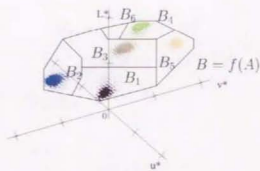
$$B_k \neq \phi \quad (k = 1, 2, \dots, K),$$

$$B_k \cap B_{k'} = \phi \quad (k, k' = 1, 2, \dots, K, k \neq k')$$

とする。すなわち、クラスタ分割は構成色集合の直和分割とする。



原画像



原画像の色分布

図 3.5: 構成色集合のクラスタ分割

クラスタ B_k に属する色をもつ画面上の点集合を $A_k = f^{-1}(B_k)$, クラスタ B_k の代表色を $c_k \in \mathbb{R}^3$ とすると, 代表色画像 $\tilde{f}: A \rightarrow \mathbb{R}^3$ は次のように定義できる.

$\forall x \in A$ に対し, ある $k \in \{1, \dots, K\}$ が存在し,

$$x \in A_k \text{ ならば } \tilde{f}(x) = c_k.$$

離散画像 $f: M \rightarrow \mathbb{R}^3$ についても, 構成色集合 $B = f(M)$ のクラスタ分割 (直和分割)

$$B = (B_1, B_2, \dots, B_K)$$

が与えられたとき, クラスタ B_k の代表色を $c_k \in \mathbb{R}^3$ とすれば, 代表色画像 $\tilde{f}: M \rightarrow \mathbb{R}^3$ は, 上と同様に次のように定義される. すなわち, $M_k = f^{-1}(B_k)$ とすれば, $\forall i \in M$ に対し, ある $k \in \{1, \dots, K\}$ が存在し,

$$i \in M_k \text{ ならば } \tilde{f}_i = c_k.$$

代表色画像の構成色分布すなわち代表色分布 \tilde{G} は, 原画像が連続画像か離散画像かを問わず,

$$\tilde{G}(\{y\}) = \begin{cases} w_k, & y = c_k \ (k = 1, 2, \dots, K) \text{ のとき,} \\ 0, & \text{その他} \end{cases}$$

で定義される離散分布となる. ここに,

$$w_k = w(B_k)$$

は構成色のクラスタ B_k に属する色の重みの総和である.

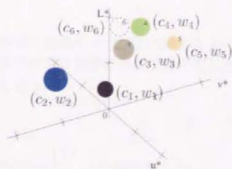
代表色分布 \tilde{G} は, グラフの形で

$$\tilde{G} = \{(c_k, w_k) \mid k = 1, 2, \dots, K\}$$

のようにも表わせる.



代表色画像 (6色)



代表色の色分布

図 3.6: 代表色画像の色分布

(2) 代表色画像の近似度

前項で定義した代表色画像と原画像がどのくらい近いかを、画面全体に対するメトリックな色差 — 全色差 — で計ることにしよう。

全色差として、適当な $p \geq 1$ をパラメタとして、次に示す全平均色差を考えることができる。

(全 (p 乗) 平均色差)

$$E_p = \left\{ \frac{1}{|A|} \int_A (\|\tilde{f}(x) - f(x)\|_p)^p dx \right\}^{1/p} \quad (\text{連続画像に対し})$$

$$= \left\{ \frac{1}{\#M} \sum_{i \in M} (\|\tilde{f}_i - f_i\|_p)^p \right\}^{1/p} \quad (\text{離散画像に対し})$$

ここに、 $\|\cdot\|_p$ は \mathbf{R}^3 におけるノルムであり、上記の p に応じて、

$$\|y\|_p = \{|y^1|^p + |y^2|^p + |y^3|^p\}^{1/p} \quad (p \text{ 乗ノルム})$$

とする。

全平均色差の、 $p \rightarrow \infty$ の極限として、次の全最大色差を考えることもできる。

(全最大色差)

$$E_\infty = \sup_{x \in A} (\|\tilde{f}(x) - f(x)\|_\infty) \quad (\text{連続画像に対し})$$

$$= \max_{i \in M} (\|\tilde{f}_i - f_i\|_\infty). \quad (\text{離散画像に対し})$$

ここに、 $\|\cdot\|_\infty$ は \mathbf{R}^3 における最大値ノルム

$$\|y\|_\infty = \max\{|y^1|, |y^2|, |y^3|\}$$

である。($\|\cdot\|_p$ は $p \rightarrow \infty$ のとき $\|\cdot\|_\infty$ になる。)

全色差 E_p あるいは E_∞ が小さいほど、代表色画像と原画像に近いことになる。

(3) 代表色の近似度

原画像の構成色集合を B 、色分布を G とすれば、色集合 $V \subset B$ に属するすべての色とある色 $c \in \mathbb{R}^3$ との隔たりを表わす量として、次に示す平均偏差および最大偏差を考えることができる。ただし、 $p \geq 1$ は適当なパラメタである。

〈 p 乗〉平均偏差

$$\begin{aligned} d_p(V, c) &= \left\{ \frac{1}{G(V)} \int_V (\|y - c_k\|_p)^p dG(y) \right\}^{1/p} \quad (\text{連続画像に対し}) \\ &= \left\{ \frac{1}{w(V)} \sum_{y \in V} w(y) (\|y - c_k\|_p)^p \right\}^{1/p} \quad (\text{離散画像に対し}) \end{aligned}$$

〈最大偏差〉

$$d_\infty(V, c) = \sup_{y \in V} (\|y - c_k\|_\infty).$$

これらを用いれば、各クラスタ B_k に属する色の代表色 c_k からの平均偏差および最大偏差を、それぞれ

〈クラスタ (p 乗) 平均偏差〉

$$d_{p,k} = d_p(B_k, c_k),$$

〈クラスタ最大偏差〉

$$d_{\infty,k} = d_\infty(B_k, c_k)$$

のように定義することができる。

さらに、クラスタ平均偏差およびクラスタ最大偏差から、画像全体における全平均偏差および全最大偏差を、それぞれ次のように定義することができる。

〈全平均偏差〉

$$D_p = \left\{ \sum_{k=1}^K w(B_k) (d_{p,k})^p \right\}^{1/p},$$

〈全最大偏差〉

$$D_\infty = \max_{k=1, \dots, K} (d_{\infty,k}).$$

このように定義した全偏差と、先に定義した全色差は、原画像が連続画像であるか離散画像であるかを問わず、じつは一致することが簡単な計算によりわかる：

$$\begin{aligned} E_p &= D_p, \\ E_\infty &= D_\infty. \end{aligned}$$

(4) 最適クラスタ分割と最適代表色

全色差あるいは全偏差を最小にするクラスタ分割あるいは代表色について、次の事実が知られている。

- a) 最適クラスタ分割 代表色の組が与えられたとき、全色差を最小にするクラスタ分割は、代表色を母点とする色空間 \mathbf{R}^3 の勢力圏分割 (3次元の Voronoi 分割) にもとづく分割である。適当な $p \geq 1$ あるいは $p = \infty$ に対し、この分割は

$$B_k = B \cap V_k,$$

$$V_k = \left\{ y \in \mathbf{R}^3 \mid \begin{array}{l} \|y - c_k\|_p < \|y - c_{k'}\|_p, k' = 1, \dots, k-1; \\ \|y - c_k\|_p \leq \|y - c_{k'}\|_p, k' = k+1, \dots, K \end{array} \right\}$$

で与えられる。(\mathbf{R}^3 の勢力圏分割において、この分割を直和分割とするために、境界上の点はどれか一つの分割成分に必ず属するようにした。)

- b) 最適代表色 構成色のクラスタ分割が与えられたとき、全色差を最小にする代表色は、各クラスタのセントロイド (すなわちクラスタ偏差を最小にする代表色) である。

偏差 $d_p(V, c)$ を最小にする c のことを、集合 V のセントロイド (重心) という。
 $p = 2$ の場合、色集合 $V \subset B (V \neq \emptyset)$ のセントロイド $c_2(V)$ は次で与えられる。

($p = 2$ の場合のセントロイド)

$$c_2(V) = \frac{1}{G(V)} \int_V y dG(y) \quad (\text{連続画像に対し})$$

$$= \frac{1}{w(V)} \sum_{y \in V} w(y)y \quad (\text{離散画像に対し})$$

$p = \infty$ の場合、色集合 $V \subset B (V \neq \emptyset)$ のセントロイド $c_\infty(V)$ は次で与えられる。

($p = \infty$ の場合のセントロイド)

$$c_\infty(V) = (\hat{y}^1, \hat{y}^2, \hat{y}^3),$$

$$\hat{y}^j = \frac{1}{2} \left\{ \sup_{y \in V} (y^j) + \inf_{y \in V} (y^j) \right\}.$$

$p = 2$ および $p = \infty$ 以外の場合には、セントロイドの簡単な計算法はない。各クラスタ B_k のセントロイドを、とくに

$$c_{p,k} = c_p(B_k)$$

と書くことにする。

なお、代表色を各クラスタのセントロイドにとったときのクラスタ2乗平均偏差とクラスタ最大偏差の間には、次の関係がある。

$$\begin{aligned}
 d_{2,k} &= \left\{ \frac{1}{G(B_k)} \int_{B_k} (\|y - c_{2,k}\|_2)^2 dG(y) \right\}^{1/2} \\
 &\leq \left\{ \frac{1}{G(B_k)} \int_{B_k} (\|y - c_{\infty,k}\|_2)^2 dG(y) \right\}^{1/2} \\
 &\leq \left\{ \frac{1}{G(B_k)} \int_{B_k} (\sqrt{3}\|y - c_{\infty,k}\|_{\infty})^2 dG(y) \right\}^{1/2} \\
 &\leq \sqrt{3} \left\{ \frac{1}{G(B_k)} \int_{B_k} (d_{\infty,k})^2 dG(y) \right\}^{1/2} \\
 &= \sqrt{3} d_{\infty,k} \left\{ \frac{1}{G(B_k)} \int_{B_k} dG(y) \right\}^{1/2} \\
 &= \sqrt{3} d_{\infty,k}
 \end{aligned}$$

また、このとき、全2乗平均偏差と全最大偏差については、

$$D_2 \leq \sqrt{3} D_{\infty}$$

が成立つ。

3.3 代表色抽出のアルゴリズム

この節以後は、計算機処理による実用的見地から、離散画像についてのみ考察を進める。

(1) LBG アルゴリズム

クラスタの数すなわち代表色の数が与えられたとき、全色差を最小にする最適分割および最適代表色を求める問題を考える。

離散画像の場合は全構成色数が有限となるから、分割の仕方もある有限個であり、したがって、理論的には、枚挙法によって最適解を見つけることができる。しかし、実際の問題における全構成色数は膨大となり、枚挙法を実行することは不可能である。

この問題を解くための近似アルゴリズムに、Linde, Buzo, Gray 3氏による LBG アルゴリズム (K 平均クラスタ法とも呼ばれる) が有効である [44, 45]。

(LBG アルゴリズム)

- i) 初期の代表色列を $c^0 = (c_1^0, c_2^0, \dots, c_K^0)$ 、初期の全偏差を $D^0 = \mu$ ($\mu > 0$ は大きな定数) とする。
- ii) 与えられた代表色列 c^0 に対する最適クラスタ分割

$$B = (B_1, B_2, \dots, B_K)$$

を求める。(すなわち、 $c_1^0, c_2^0, \dots, c_K^0$ を母点とする R^3 の勢力圏分割にもとづき、構成色集合 B を分割する。)

iii) 得られた分割 B に対する最適代表色列

$$c = (c_1, c_2, \dots, c_K)$$

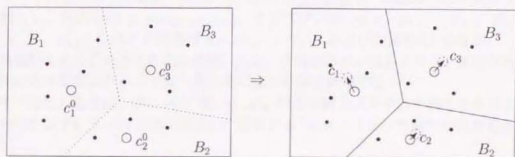
および重み列

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_K)$$

を求める。(すなわち、各クラスタ B_k のセントロイド $c_k = c_{p,k}$ および重み $w_k = w(B_k)$ を求める。)

iv) 各クラスタ偏差 $d_k = d_{p,k}$ を計算し、全偏差 $D = D_p$ を求める。
微小定数 $\delta > 0$ に対し、

$$\left\{ \begin{array}{l} |D - D^0| \geq \delta \text{ であれば,} \\ \quad c^0 := c \text{ および } D^0 := D \text{ として ii) へもどる.} \\ \\ |D - D^0| < \delta \text{ であれば,} \\ \quad \text{収束したとみなし, 代表色列 } c, \text{ クラスタ} \\ \quad \text{分割 } B, \text{ 重み列 } w, \text{ クラスタ偏差列 } d = \\ \quad (d_1, d_2, \dots, d_K), \text{ および全偏差 } D \text{ を出力し,} \\ \quad \text{終了する.} \end{array} \right.$$



ii) c^0 に対する最適分割 B を求める。 iii) B に対する最適代表色列 c を求める。

図 3.7: LBG アルゴリズムのステップ ii) と iii)

このアルゴリズムは、 $p = 2$ または $p = \infty$ 以外の場合には、各クラスタのセントロイドの計算が簡単ではないので、実用的でない。

$p = 2$ の場合には、iv) の各クラスタ偏差の計算の代わりに、重みつきクラスタ偏差 e_k の平方

$$e_k^2 = \sum_{y \in B_k} w(y) (\|y - c_k\|_2)^2, \quad k = 1, 2, \dots, K,$$

を計算し、全偏差を次によって求めてもよい。

$$D = \left\{ \sum_{k=1}^K e_k^2 \right\}^{1/2}.$$

このとき、クラスタ偏差 d_k は、重みつきクラスタ偏差 e_k から

$$d_k = \frac{1}{\sqrt{w_k}} e_k, \quad k = 1, 2, \dots, K,$$

によって計算される。

(2) 逐次クラスタ分割法

適切なクラスタの数あるいは適切な代表色の数を定めることは難しい。そこで、ただ1色から始めて、全偏差あるいは各クラスタ偏差が十分小さくなるまで1色づつ色数を増やす方法が考えられる。この方法を逐次クラスタ分割法 (successive splitting cluster method) と呼ぶ。以下、 $p=2$ または $p=\infty$ とする。

(逐次クラスタ分割法のアルゴリズムの概要)

- i) 初期の代表色数 $K=1$ とし、代表色列 $c^0 = (c_1^0)$ を与える。 c_1^0 は全構成色集合のセントロイド

$$c_1^0 = C_p(B)$$

とする。

- ii) 与えられた代表色の候補の列 $c^0 = (c_1^0, \dots, c_K^0)$ に対し、前述の LBG アルゴリズムを実行し、代表色列 $c = (c_1, \dots, c_K)$ 、クラスタ分割 $B = (B_1, \dots, B_K)$ 、重み列 $w = (w_1, \dots, w_k)$ 、クラスタ偏差列 $d = (d_1, \dots, d_K)$ 、および全偏差 D を得る。
- iii) 色数があらかじめ決めた色数に達したか、全偏差あるいは各クラスタ偏差があらかじめ決めた小定数より小さくなったときには、計算を終了する。

そうでないときは、クラスタ B_1, \dots, B_K のうち最大のクラスタ偏差をもつクラスタの一つを以下に示す方法で二分割し、色数を $K' = K + 1$ とした新たな代表色候補の列

$$c^0 = (c'_1, c'_2, \dots, c_{K'})$$

を作り、ii) から繰返す。

(一つのクラスタの分割法)

- i) 分割の対象となったクラスタを B_m とし、 B_m のセントロイドを c_m とする。
- ii) $p=2$ の場合は B_m の分散

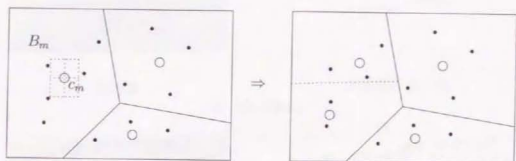
$$v^i = \frac{1}{w_k} \sum_{y \in B_m} w(y) (y^i - c_m^i)^2, \quad i = 1, 2, 3$$

を、 $p=\infty$ の場合は

$$v^i = \max_{y \in B_m} |y^i - c_m^i|, \quad i = 1, 2, 3$$

を計算し、 v^1, v^2, v^3 のうち、最大のものの(の一つ)を v^j とする。

- iii) 点 c_m を通り j 軸に直交する面で B_m を二分し、二分されたそれぞれの色集合のセントロイド二つを c_m の代わりに新たな代表色候補として採用する。 c_m 以外の代表色はそのまま新たな代表色候補とする。



$$K = 3$$

クラスタ B_1, \dots, B_K のうち最大の局所偏差をもつクラスタの一つ B_m を二分する。

$$K' = K + 1 = 4$$

二分されたそれぞれの色集合のセントロイド二つを c_m の代わりに新たな代表色候補として採用する。 c_m 以外の代表色はそのまま新たな代表色候補とする。

図 3.8: 逐次クラスタ分割法

なお、上述の逐次クラスタ分割法では、クラスタ偏差の大きいクラスタを分割するとしたが、相対面積(重み)の大きい代表色の近似をよりよくすることを目標とし、重みつきクラスタ偏差の大きいクラスタを分割する考え方もある。

逐次クラスタ分割法は、近似の度合を確認しながら作業を進めるのに都合がよい。

(3) 逐次クラスタ分割法の例

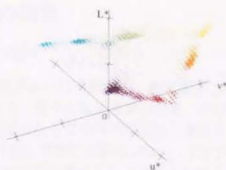
逐次クラスタ分割法による代表色画像生成の例を、図 3.9 に示す。色空間は $L^*u^*v^*$ である。 $p=2$ とした。代表色の色分布図において、代表色を表す丸印の面積は、重さに比例させてある。

(a) の画像は、W.Kandinsky の絵画 “Komposition IX”, 1936 (文献 [46] より) である。原画像の色分布は雲状であり、色数は特定できない。色数を多くしないと、代表色画像と原画像が近くならない例である。なお、原画像の色分布において、赤から赤茶にかけて線状の分布がみられるが、これは代表色画像にも点列として反映されている。

(b) の画像は S.A.Séguy のパターン画 (文献 [47] より) であり、色数が 6 と特定できる例である。原画像において、同一色の部分が大きい面積を占めるが、それは集積する点群として色分布に現われている。



原画像

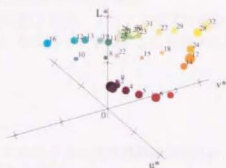


原画像の色分布

⇓ 代表色抽出



代表色画像 (32色)

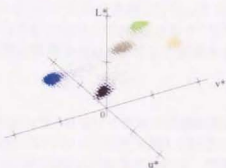


代表色の色分布

(a) 色数の多い例



原画像

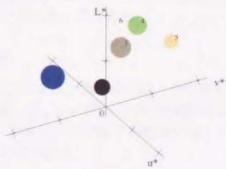


原画像の色分布

⇓ 代表色抽出



代表色画像 (6色)



代表色の色分布

(b) 色数の少ない例

図 3.9: 逐次クラスタ分割法による代表色画像生成の例

3.4 代表色抽出における実用上の問題

(1) 最大偏差をとるか2乗平均偏差をとるか

代表色抽出アルゴリズムにおけるクラスタ偏差あるいは全偏差を、最大偏差 ($p = \infty$) とするか2乗平均偏差 ($p = 2$) とするかの問題がある。種々の数値実験の結果、次の事実がわかった [44]。代表色による近似に際し、重みが考慮される2乗平均偏差は、逐次クラスタ分割法により全偏差を一定値以下にするまでの繰り返し回数が比較的少ない。すなわち「収束」が速い。ただし、微小面積でも有効なアクセント色などは消えてしまうことがある。これに対し、最大偏差は重みに無関係なので、アクセント色の抽出などには有効である。しかし、ノイズの影響を受けやすく、逐次クラスタ分割法における収束も遅い。

これらのことから、本論文における代表色抽出に際しては、すべて2乗平均偏差を用いることにした。なお、アクセント色に対しては、(3)項に述べる手法により対処することができる。

(2) 代表色の色数の決め方

代表色の色数を何色とすれば、色彩分析を行なうのに十分な代表色画像が得られるであろうか。この問題に対し、これまでいくつかの検討を行なった [48, 49, 50, 51]。

(a) 同じとみなせるかの実験

何色の代表色画像であれば原画像と“同じとみなせるか”を問う実験を行なった [49]。この結果によれば、代表色数は高々数十程度でよさそうであったが、“同じとみなす”基準があいまいであり、また原画の構図や絵柄などにより判断が影響を受け、安定した結果を得ることができなかった。

(b) 違いが認められるかの実験

構図や絵柄の影響を避けるため、 10×10 および 20×20 のモザイク画を原画像とし、色数を順次増加させた代表色画像と比較し、“違いが認められるか”を問う実験を行なった [50]。この結果からは、モザイク画のように一マスごとの色の比較が可能な場合には、原画と代表色画像の対応箇所の色差を基準に画像の“違い”を判別していると考えられた。この場合のように、原画像と違いが認められない代表色画像を得るには、逐次クラスタ分割法の終了条件として、全平均偏差をある与えられた小さい値に留める、すなわち

$$D_2 < \varepsilon_{\text{total}}$$

なる条件が妥当と思われた。ここにある小定数 $\varepsilon_{\text{total}} > 0$ は、具体的には、色空間を $L^*u^*v^*$ 色空間あるいは $L^*a^*b^*$ 色空間とする場合、たとえば $\varepsilon_{\text{total}} = 5$ がひとつの候補である。(これはおよそプロセス印刷の許容限界値程度である。)しかし、この終了判定条件は、絵画の色彩的印象を問題にする場合には、厳し過ぎるように思われた。

(c) 色数を数える実験

通常の観測条件で色数が容易に判定できる画像がある。たとえば図 3.9(b) に示す Séguy のパターン画に対して、この画像は何色で構成されているかと問えば、誰でも6色と答えるで

あろう。より複雑な画像に対しても、何色で構成されているかという間に対して、人は、パツキはあるもののほとんどの場合、10~20程度の色数を答える。

画像を見て色数を数える行為には、その画像中に同じ色があるかないかの判断が含まれている。そこで、原画像およびいくつかの色数を変えた画像に対して構成色数を問う実験を行なった [51]。原画像に対して答えた色数と代表色画像に対して答えた色数とを比較検討し、さらに代表色画像の重みつきクラスタ偏差や全平均偏差との対応をみたところ、アクセント色やグラデーションの再現を考えなければ²、次の二つの終了条件で満足のいく代表色画像が得られることがわかった。(色空間は、 $L^*u^*v^*$ 色空間および $L^*a^*b^*$ 色空間として調べた。)

- i) 色数がある一定値以上になったらクラスタ分割をやめる。すなわち、たとえば $K_{\max} = 20$ として、

$$K \geq K_{\max}$$

となったらクラスタ分割を終了する。

- ii) すべてのクラスタについて、重みつきクラスタ平均偏差がある小定数より小さくなったからクラスタ分割をやめる。すなわち、たとえば $\epsilon_{\text{local}} = 1.5$ として、

$$\max_{k=1, \dots, K} (e_k) \leq \epsilon_{\text{local}}$$

となったらクラスタ分割を終了する。

これらの実験結果をふまえ本論文では、すべての絵画画像に対し、 $L^*u^*v^*$ 色空間において、上記の i) あるいは ii) のどちらかが成り立ったとき、クラスタ分割をやめることにした。 K_{\max} および ϵ_{local} の値は、 $K_{\max} = 20$ および $\epsilon_{\text{local}} = 1.5$ とした。

なお、微小面積でも周辺との色差が大きく強い印象を与えるアクセント色や、色が場所とともに微妙に変化するグラデーションの再現を考えるならば、2乗平均で重みつきクラスタ偏差や全偏差を計算する方法では、色数 K をよほど多くとる (たとえば $K_{\max} = 50$) か、重みつきクラスタ偏差の許容値 ϵ_{local} をよほど小さくとる (たとえば $\epsilon_{\text{local}} < 1$) 必要がある。

(3) 部分画像の代表色と全体画像の代表色

絵画にはしばしば、微小な面積でも重要な役割を果たすアクセントとなる色が用いられる。しかし、重みつきの2乗平均偏差を用いる場合に(2)項に述べたアクセント色の相対面積が0.1%以上でなければ抽出できない [51]。そこで、アクセント色の相対面積が大きくなるように画像を一部切り取り、その部分に対して代表色抽出を行なうことを考える。切り取った部分画像から求めた代表色と、残りの画像から求めた代表色とを合わせ、それぞれの代表色の近いものを1色にまとめれば、アクセント色を含む代表色画像が作成できる。

一つの画像 F が、二つの部分画像 A と B に分割されるものとする (図 3.10)。画像 A の構成色列および対応する重み列を、それぞれ

$$\begin{aligned} c_A &= (a_1, a_2, \dots, a_M), \\ w_A &= (u_1, u_2, \dots, u_M) \end{aligned}$$

² 絵を目を細めて眺める、あるいは遠くから眺めるなど、およその色彩的印象をとらえるには十分。

とする。(u_i が a_i の重み. $u_i > 0, \sum_{i=1}^M u_i = 1.$) また, 画像 B の構成色列および対応する重み列を, それぞれ

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_B &= (b_1, b_2, \dots, b_N), \\ \mathbf{w}_B &= (v_1, v_2, \dots, v_N) \end{aligned}$$

とする。(v_i が b_i の重み. $v_i > 0, \sum_{i=1}^N v_i = 1.$)

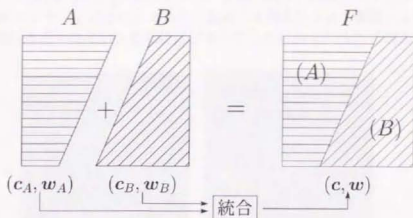


図 3.10: 画像 F と部分画像 A および B

A および B の二つの色分布を統合し, F の色分布を構成するアルゴリズムは種々考えられるが, 次に示すアルゴリズムは, 画素の構成色の中で互いに色差が微小正数 $\epsilon (> 0)$ より小さいものだけを統合し他はもとのままとする, 最も簡単なアルゴリズムである。以下で, \mathbf{c} は F の構成色列, \mathbf{w} はそれに対応する重み列である。また, $|A|$ および $|B|$ はそれぞれ画像 A および B の画面の面積である。

(色分布の統合アルゴリズム)

- i) \mathbf{c}, \mathbf{w} を空列とする。 $k = 0$ とする。
- ii) \mathbf{c}_A の要素 a_i および \mathbf{c}_B の要素 b_j のすべての組 (a_i, b_j) の中で, a_i と b_j の色差 $e = \|a_i - b_j\|$ が最小となるものを選ぶ。
- iii) 微小定数 $\epsilon > 0$ に対し,

$e < \epsilon$ ならば, <ul style="list-style-type: none"> • $k := k + 1$ とし, $c_k := \frac{ A u_i a_i + B v_j b_j}{ A u_i + B v_j}$, $w_k := \frac{ A u_i + B v_j}{ A + B }$ とする。 • \mathbf{c}_A から a_i を削除し, \mathbf{c}_B から b_j を削除する。 • \mathbf{c} に c_k を追加し, \mathbf{w} に w_k を追加する。 • ii) に戻り繰り返し。
$e \geq \epsilon$ ならば, [色差が ϵ より小さい組 (a_i, b_j) はないから] <ul style="list-style-type: none"> • \mathbf{c} と \mathbf{c}_A と \mathbf{c}_B をこの順に連結し, それをあらためて \mathbf{c} とする。 • \mathbf{w} と \mathbf{w}_A と \mathbf{w}_B をこの順に連結し, それをあらためて \mathbf{w} とする。 • 終了する。

以上で, 全画像 F の (\mathbf{c} および \mathbf{w} で定まる) 色分布が生成された。

部分画像のそれぞれの色を統合するか否かの基準となる ε の定めかたについては、たとえば、 ε_A を A の構成色中の最小色差、 ε_B を B の構成色中の最小色差とすると、

$$\varepsilon = \min(\varepsilon_A, \varepsilon_B)$$

とすることが考えられる。

Claude Monet の“睡蓮”[Mo17]を例に述べる。この作品では画面中央の少し上にある睡蓮の花のピンク色がアクセント色となっている。重みつき最大クラスタ偏差 1.5 として代表色を求めると色数は 19 色となるが、ここにはアクセント色は含まれない(図 3.11)。

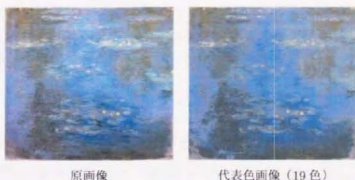


図 3.11: 原画像とアクセント色の失われた代表色画像

そこで、アクセント色を含む部分画像(全体の約 1.4%の部分)を取り出し、同じ基準で代表色を求めたところ、15 色となった。これと残りの部分の画像から求めた代表色(やはり 19 色となった)とを上述のアルゴリズムにより統合したところ、アクセント色を含む 26 色からなる代表色画像を作ることができた(図 3.12)。



図 3.12: 部分画像の代表色の統合

上に述べた部分画像の代表色から全体画像の代表色を構成する方法は、アクセント色の抽出のみならず、たとえば、そのままではスキャナにかからない大きな画像を部分画像に分割して取り込み、あとから全体画像の代表色を得るという場合にも適用可能である。

4 絵画の色彩的特徴と色分布

これから先の章では、著名な画家の絵画作品を対象とし、その色彩美の数理的な分析を試みる。

そこでこの章では、まず分析の対象としてとりあげる10人の画家の作品を紹介し、一般に知られているその色彩的特徴を述べる。つぎに、いくつかの絵画画像を例にとり、その代表色の色分布に典型的な配色構造がみられることを示す。さいごに、データソースにかかわる問題を論じる。

4.1 分析の対象とする絵画作品とその色彩的特徴

以後の章で分析の対象とするのは、表4.1に示す10人の画家、Caravaggio, Rembrandt, O.Redon, C.Monet, R.Dufy, P.Klee, F.Marc, M.Utrillo, 梅原、および木村の作品群である。各画家とその作風のごく簡単な解説と、とりあげた作品の色彩的特徴を、文献[52, 53, 54, 55]をもとに簡潔に述べる。各画家の作品群ごとに、その色彩的特徴を把握できるように、原画の縮小画像と作品名のリストを示す。なお、後の引用の便のために、各画家および各作品に略号を付す。

表 4.1: とりあげる 10 人の画家と作品数

略号	画家	生国	生没年	分析対象作品数
C	Caravaggio (カラヴァッジオ)	イタリア	1573-1610	19
Rm	Rembrandt (レンブラント)	オランダ	1606-1669	20
R	O.Redon (ルドン)	フランス	1840-1916	19
Mo	C.Monet (モネ)	フランス	1840-1926	24
D	R.Dufy (デュフィ)	フランス	1877-1953	17
K	P.Klee (クレー)	スイス	1879-1940	30
Ma	F.Marc (マルク)	ドイツ	1880-1916	8
Ut	M.Utrillo (ユトリロ)	フランス	1883-1955	23
Um	梅原龍三郎	日本	1888-1986	12
Ki	木村忠太	日本	1917-1987	11

計 183 作品

(a) Caravaggio[1573-1610]

本名 Michelangelo Merisi da Caravaggio. バロック最大の画家。イタリアのミラノ近くのカラヴァッジオ出身ゆえ、単にカラヴァッジオと称される。初期は写実により静物・風俗を描く。のちの宗教画に用いられた劇的な明暗表現—キアロスкуро(chiaroscuro)—の影響は、17世紀の全ヨーロッパに及ぶ。キアロスкуроを用いた当時の若い画家は、カラヴァッジオにちなみ、カラヴァッジェスキ(Caravageschi, 伊)あるいはカラヴァッジスティ(Caravaggisti, 英)と呼ばれた。

とりあげた作品19点(図4.1)は、カレンダー[56]からのものである。いずれも明暗コントラストがきわめて大きく、黄-茶系を主とし若干の赤や緑を交えている。色彩効果より明暗効果がはるかに大きい印象を与える。



番号	作品名	作年
C01	Concerto di giovani	1595-96
C02	Suonatore di liuto	1595-96
C03	La buona ventura	1596-97
C04	La conversione della Maddalena	1598
C05	Vocazione di San Matteo	1599-1600
C06	Martorio di San Matteo	1599-1600
C07	La cena in Emmaus	1601
C08	Canestro di frutta	1598-99
C09	エジプトへの逃走中の休息(部分)	1596-97
C10	病めるパックス	1593-94
C11	果物籠を持つ少年	1593-94
C12	若きパックス	1596
C13	聖カテリーナ	1598
C14	聖ペテロの擧げ	1601
C15	聖バオロの改宗	1601
C16	キリストの埋葬	1602-03
C17	聖母の死	1606
C18	ロザリオのマドンナ	1607
C19	慈悲の7つの行ない	1606

図 4.1: Caravaggio の作品群

(b) Rembrandt[1606-1669]

本名 Rembrandt van Rijn. オランダのレイデンの生まれ。アムステルダムで肖像画家として成功をおさめた。Caravaggio の明暗表現をより内面化し、宗教画も描く。貧困のうちにあった晩年の作風は重厚で、とくに自画像 (Rm20) はきわめて深い精神性を獲得しているとされる。

とりあげた作品は画集 [57] からのものである (図 4.2)。Caravaggio と比べて明暗表現は若干押さえられているが、色彩的には Caravaggio と同様の黄-茶系が主調である。やはり、色彩的印象より明暗的印象が強い。



略号	作品名	作年	略号	作品名	作年
Rm01	ダビデ王の手紙を読むバネシバ	1654	Rm11	ラザロの復活	1630-31
Rm02	聖ステパノの殉教	1625	Rm12	羽根ペンを削る若い男	1632
Rm03	息子のイクサの生けにえを天使に止められるアブラハム	1635	Rm13	織物組合の代表たち	1662
Rm04	目をえくられるサムソン	1636	Rm14	水浴するサザナとそれを養う2人の老人たち	1647
Rm05	壁に現れた文字を見るベルシャザル王	1635	Rm15	川で水浴するヘンドリック	1651
Rm06	サムソンを裏切るデリラ	1629-30	Rm16	クラウディアス・キウィリスの謀議	1661-62
Rm07	幼児キリストを誦入るシメオン	1628	Rm17	ヨセフの息子たちを祝福するヤコブ	1656
Rm08	話し合うペテロとパウロ	1628	Rm18	家族の肖像	1668-69
Rm09	アハシュエロス王に召されるエステル	1633	Rm19	ホメロスの胸像を見るアリストテレス	1653
Rm10	女預言者ハンナ	1631	Rm20	自画像	1661

図 4.2: Rembrandt の作品群

(c) O.Redon[1840-1916]

Odilon Redon. フランスのボルドー生まれ、象徴派の文学者との交流があった、後年の作品は、油彩やパステルで花や人物をモチーフにしたものが多い、神秘的な色彩世界を展開した孤高の画家である。

とりあげた作品はカタログ [58] からのものである (図 4.3)。グラデーションによる表現が多用され、幻想的な印象を与えている。色彩構成は比較的単純であり、青と黄の補色配色が多いが、中には赤と緑の補色配色もみられる (R08,R14 など)。



題号	作品名	作年
R01	ペガサスにのるミューズ	1907-10
R02	天使と格闘するヤコブ	1905 頃
R03	球、あるいは黄色のケープ	1895 頃
R04	曙光のある出現 (曙の乙女)	1895 頃
R05	出現	不明
R06	ステンドグラスの窓	1905-08
R07	幻想的な人物	不明
R08	後光	不明
R09	夢	1905
R10	ドルイド教の巫女	1910
R11	花のある人物	1905
R12	夢想	1900-05
R13	夢	不明
R14	キリストと蛇	1895-1900
R15	オフイーリア	1900 頃
R16	オフイーリア	1905-06
R17	オルフェウスの死	1905-10
R18	神秘的な小艇	1890-1900
R19	アポロンの二輪馬車	1905-10

図 4.3: O.Redon の作品群

(d) C.Monet[1840-1926]

Claude Monet. フランスのパリ生まれ。初期ノルマンディで E.Boudin の感化を受ける。第1回印象派展に出品。光と色の探究はそのまま印象派の軌跡となった。後半ジヴェルニーの自邸の庭を主題に描いた睡蓮の連作は有名。

ここにとりあげた作品は、カタログ[59]からのものである(図4.4)。“印象派=光と色”という連想に反して、色使いの抑えられたものが多い。ただし、睡蓮の絵(Mo01,Mo17,Mo21)などに、薄い赤や黄のアクセントなど、微妙な色使いが見られる。彩度が低く、明暗の差も少ない。



略号	作品名	作年	略号	作品名	作年
Mo01	睡蓮とアガパンサス	1914-17	Mo13	バラの小道	1920
Mo02	オンフルールの港の船	1917	Mo14	バラの庭から見た家	1922-24
Mo03	霧にかすむチャーリング・クロス橋	1899-1901	Mo15	バラの庭から見たジヴェルニーの家	1922-24
Mo04	チャーリング・クロス橋	1899-1901	Mo16	ノルウェーの風景、青い家	1895
Mo05	白いクレマチス	1887	Mo17	睡蓮	1903
Mo06	クルーズの谷、夕暮れの効果	1889	Mo18	睡蓮	1907
Mo07	断崖とボルト・ダモン、朝の効果	1885	Mo19	日本の橋	1918
Mo08	ジヴェルニーのセーヌの支流	1885	Mo20	ポール＝ヴィレのセーヌ川、夕暮れの効果	1894
Mo09	キスダ	1914-17	Mo21	睡蓮、橋の反映	1916-19
Mo10	アイリス	1924-25	Mo22	サッソーの谷、陽光の効果	1884
Mo11	黄色と薄紫のアイリス	1924-25	Mo23	しだれ柳	1918-19
Mo12	ノルウェーのコルサス山	1895	Mo24	フォールザーンの眺望	1871

図 4.4: C.Monet の作品群

(e) R.Dufy[1877-1953]

Raoul Dufy. フランスのル・アーブル生まれ。初期は印象派風。フォーヴィズム(H.Matisseの影響)や構成的な画風(P.Cézanneの影響)を経て、独自の様式を確立した。画家であると同時に織物デザイナーでもあった。

とりあげた作品は、カタログ[60]からのものである(図4.5)。D01,D02,D03は初期の印象派風。D04,D05(フォーヴィズムの影響がみられる)あたりから多色の美しい色使いが見られるようになる。D06にはキュビズム風の表現が見られるが、D07以後では独自の表現に移る。地中海の陽光を思わせる明るい透明感のある彩画に、軽快な線描が走る。カラリスト(colorist)といわれるだけに、たくみな配色である。また、“Dufyの青”といわれるDufy独特のあざやかな青背景の絵(D09,D14,D15など)は、印象的である。



略号	作品名	作年
D01	百画像	1894 頃
D02	パリのサン・ジェルヴェー聖堂	1900
D03	マルティグのカフェのテラス	1904
D04	裏に飾られた街	1906
D05	花の中のジャンヌ	1907
D06	バラ色の衣裳の夫人	1908-09 頃
D07	庭のある家	1915
D08	海で泳ぐ女と貝	1925-27 頃
D09	ル・アーブルのアトリエでの画家とモデル	1929
D10	ラ・ヴィ・アン・ローズ	1933
D11	探検者たち	1938
D12	赤い影のある画家のアトリエ	1949
D13	黒い貨物船	1950 頃
D14	アンフイトリテ	1935-53
D15	ル・アーブルの海	1924-25
D16	空の習作	1937 頃
D17	コマンジュの脱殺	1943

図 4.5: R.Dufy の作品群

(f) P.Klee[1879-1940]

Paul Klee. スイスのベルン生まれ、近代美術における最も独創的で影響力の大きな画家とされる。造形の新しい可能性を実験した画家ともいわれる、造形活動の府バウハウスの絵画教授であり、絵画・色彩の理論家であった。教育や作品が進歩的芸術に及ぼした影響は、はかり知れない。画風は、独自の記号的・抽象的表現と、詩的・音楽的な情感にみちている。

とりあげた作品は、著名な音楽家 P.Blaise の著書 [61] からのものである (図 4.6)。色彩表現は多岐にわたるが、構図はいずれも均整がとれている。



図 4.6: P.Klee の作品群

略号	作品名	作年	略号	作品名	作年
K01	アラビアの町	1922	K16	寒色・暖色に基づいた空間建築	1915
K02	ポリフォニックな建築	1930	K17	木々でリズムづけられた風景の中のラクダ	1920
K03	パッサンのスタイルで	1919	K18	調和のとれた戦い	1937
K04	観相学的稲妻	1927	K19	星座の軽感を持った結晶のグラデーショ	1921
K05	高い「音」の軌章	1921	K20	オリエントの建築	1929
K06	エマハト	1932	K21	植物文字絵	1932
K07	肥沃な国の記念碑	1929	K22	ビルラ	1924
K08	赤のワグ	1921	K23	ポリフォニー	1932
K09	庭のヴォジョン	1925	K24	リズムカルなもの	1930
K10	バイエルンのドン・ジョヴァンニ	1919	K25	ポリフォニックにはめ込まれた白	1930
K11	動力学的にポリフォニックなグループ	1931	K26	魔法の庭	1926
K12	本道と節道	1929	K27	記号の集積	1924
K13	風景の中の家々	1924	K28	遊離所	1930
K14	晴れやかな建築物	1917	K29	さえずり機械	1922
K15	美わしき女従師	1939	K30	町の前に立つ子どもたち	1928

図 4.6: P.Klee の作品群 (つづき)

(g) F.Marc[1880-1916]

Franz Marc. ミュンヘン生まれ。W.Kandinsky とともに「青騎士」を結成した。ドイツ表現主義の重要な画家。キュビズムや R.Delauney の影響をうけ、未来派もとり入れた。動物をモチーフに、フォルムの探究から抽象画に接近したが、若くして戦死した。

とりあげた作品は、雑誌 [62] からのものである (図 4.7)。数は少ないが、いずれも色相および明暗の対比を効果的に用いている。とくに彩度の高い黄、青、緑、赤の配色が印象的である。



略号	作品名	作年
Ma01	風景のなかの馬	1910
Ma02	黄色い牛	1911
Ma03	雨の中	1912
Ma04	2匹の猫	1912
Ma05	青い鹿	1913
Ma06	飲物者聖ウリアヌス	1913
Ma07	動物の運命	1913
Ma08	戦うフォルム	1914

図 4.7: F.Marc の作品群

(h) M.Utrillo[1883-1955]

Maurice Utrillo. パリ生まれ。女流画家 S.Valadon の息子。アルコール中毒の治療のひとつとして絵を書き始める。独学。

カタログ [63] からここにとりあげた“白の時代”の絵は、パリの街角や家壁を描いたもの(図 4.8)。明るい白や黄の壁と青い空といった単純な補色配色に、屋根の赤などのアクセントが添えられ、素材でおだやかな印象を与えている。



番号	作品名	作年	番号	作品名	作年
Ut01	サルセールの大通り	1908 頃	Ut13	モンマルトル ノルヴァン通り	1914 頃
Ut02	サントゥアンの絵具屋	1909 頃	Ut14	サン・ルスデック通り	1914 頃
Ut03	モンマルトル ノルヴァン通り	1910	Ut15	オー・カポー・ド・リル・デ・サンジュ	1918 頃
Ut04	パリ サンジェルヴェー教会	1910 頃		酒場	
Ut05	シャティヨン・シェール・セーズの教会	1911 頃	Ut16	ジュノ大通りのユトリロの家	1927
Ut06	マルカデ通り	1911 頃	Ut17	サン・ドニ	1930 頃
Ut07	フェルテ・ミロンの城	1912 頃	Ut18	モンマルトル アベス広場	1931 頃
Ut08	サント・マルグリット教会	1912 頃	Ut19	パリ市の城壁	1933 頃
Ut09	サン・ジャン・オー・ポアの教会	1912 頃	Ut20	ピエーヴルの教会	1934 頃
Ut10	モンマルトル ローゼ通り	1913 頃	Ut21	モンマルトルの雑木林	1935 頃
Ut11	コルシカの教会	1913 頃	Ut22	シュパンソーのユニオン・ホテル	1937
Ut12	村の教会	1913 頃	Ut23	モンマルトルの三風車	1943

図 4.8: M.Utrillo の作品群

(i) 梅原龍三郎 [1888-1986]

京都生まれの洋画家。渡仏し、A.Renoir に師事。豊かな色彩を用いた桜島・北京時代は、安井曾太郎とともに梅原・安井時代と称される。

とりあげた“花”の作品は、カタログ [64] からのもの (図 4.9)。黄から赤にかけての同系・類似配色を用いた、明暗差の少ない落ち着いた絵が多い。



番号	作品名	年
Um01	椿	1915
Um02	薔薇園	1940
Um03	黒薔薇	1940
Um04	萬葉薔に薔薇	1943
Um05	椿	1944
Um06	薔薇	1945
Um07	薔薇 (季朝の畫)	1973
Um08	牡丹図 (季朝畫)	1975
Um09	大根島の牡丹とエジプトの壺	1976
Um10	チューリップ	1976
Um11	白梅図	1977
Um12	薔薇園	1981

図 4.9: 梅原の作品群

(j) 木村忠太 [1917-1987]

香川県生まれの洋画家。渡仏以来バリエに定住。簡略化された即興的な線と洗練された色彩が、東洋と西洋の融合として高い評価を受ける。

ここにとりあげた作品は、展覧会のカタログ [65] からのもの (図 4.10)。黄色と紫、オレンジと緑がなす色彩調和と、画面の大きな領域分割による色彩構成が特徴的である。



題号	作品名	作年
Ki01	トウレットの夏	1970
Ki02	ラ・ロケット = シュル = シアニュー	1971
Ki03	セーブル風景	1961
Ki04	南仏の春	1973
Ki05	南仏	1973
Ki06	黄金の光、夕暮れ	1974
Ki07	グラス方面	1974
Ki08	流れ	1974
Ki09	プロヴァンス	1975
Ki10	フィヤンス村	1976
Ki11	ニースの旧港	1976

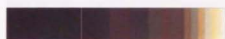
図 4.10: 木村の作品群

4.2 絵画の色分布にみられる典型的な配色構造

この節では、絵画の構成色の色分布に、色彩調和をもたらしといわれる典型的な配色構造（配色形式、配色技法などともいう）[66, 67 など]が見られることを示す。これらの配色構造は、色彩教育や色彩計画などで実用されているものでもある。

前述の絵画画像データの中から、配色に特徴のある作品を7点選び、作品ごとに代表色の色分布を示し、配色構造を解説する。以下の各図は、代表色画像（左上図）、代表色の色帯（カラーバー）および代表色の色値 (L^*, u^*, v^*) と重み（相対面積）の表（右上）、代表色の $L^*u^*v^*$ 色空間における分布の鳥瞰図（左中）およびその3面図 (u^*v^* 面, L^*v^* 面, L^*u^* 面, 下段左右) である。色分布中の丸印の面積は、重みに比例させてある。

(1) 単色配色 (モノクローム) — 明度変化



No.	Weight	L*	u*	v*	Color
1	0.086	17.95	2.71	-1.59	Black
2	0.093	20.15	1.98	-6.18	Dark Grey
3	0.137	22.36	2.12	-1.00	Dark Grey
4	0.088	21.69	8.18	-1.30	Dark Grey
5	0.966	25.03	8.23	3.31	Dark Grey
6	0.091	31.89	16.53	4.52	Dark Grey
7	0.087	32.04	9.37	2.94	Dark Grey
8	0.060	38.75	11.71	7.58	Dark Grey
9	0.035	38.96	25.05	11.86	Dark Grey
10	0.066	39.36	18.51	11.08	Dark Grey
11	0.032	49.27	26.34	21.06	Dark Grey
12	0.031	54.58	10.44	15.56	Dark Grey
13	0.012	62.17	37.33	36.23	Dark Grey
14	0.029	63.30	24.67	30.52	Dark Grey
15	0.029	70.24	10.88	21.02	Dark Grey
16	0.021	75.57	29.55	42.87	Dark Grey
17	0.023	78.45	23.02	34.82	Dark Grey
18	0.023	83.43	8.96	14.81	Yellow

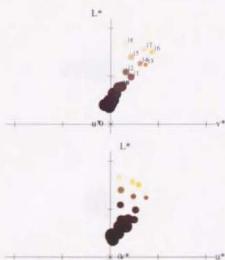
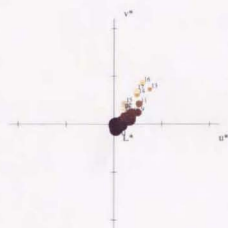
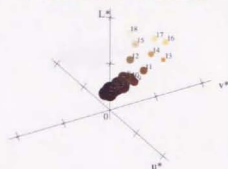


図 4.11: 単色配色 — 明度変化の例 (C06)

図 4.11: Caravaggio の “Martirio di San Matteo[1599-1600]”(C06) は、明度変化を用いた単色配色 (モノクローム, monochrome) の例である。 u^*v^* 面上の色分布は、重みの大きい無彩色 (黒) から黄方向へ直線状に伸びている。これがモノクローム (単色) のゆえんである。立面図 (L^*u^* 面, L^*v^* 面) を見ると、この色分布には、明度が増すにつれ黒からいったん彩度が増し、再び白へ近づく流れと、黒から彩度が増したまま黄色へ近づく流れの双方が見える。いずれにしても、明暗変化を色彩表現の優に位置づけたキアロスクーロが、その姿を現わしている。

明暗変化を主とする単色配色は、Caravaggio や Rembrandt の作品に多く見られる。

(2) 単色配色（モノクローム） — 彩度変化

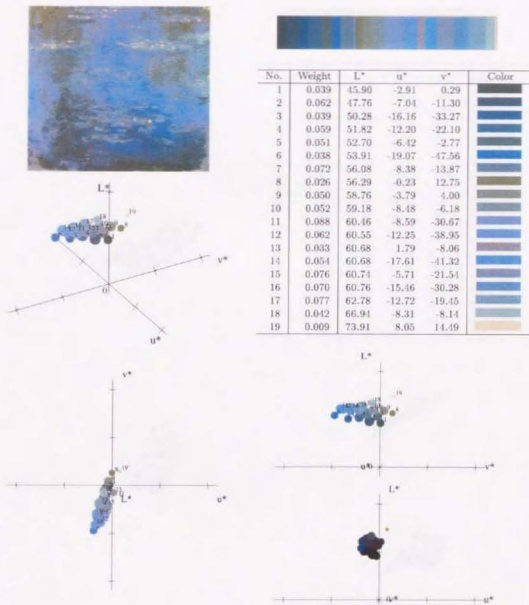


図 4.12: 単色配色 — 彩度変化の例 (Mo17)

図 4.12: C.Monet の“睡蓮 [1903]”(Mo17) の色分布は、おおまかにみれば無彩軸から青 (5PB) の方向へ向かう単色配色を示している (u^*v^* 面図)。しかも、 L^*u^* 面、 L^*v^* 面の図をみると、ほぼ一定の明度で彩度の変化を伴う分布であることがわかる。絵をよく見ると濃い黄やピンクの睡蓮の花がアクセントとなっていることに気がつく。したがって厳密にいえば、“黄やピンクのアクセント色をもつほとんどモノクロームな配色”というべきであろう。色分布をよく見ると、彩度の低い黄 (番号 19) は存在するがピンクが存在しない。これは、代表色抽出の際、相対面積の非常に小さい色が無視されたためである。

C.Monet の作品には、彩度変化を主とする単色配色が他にも見られる (Mo21, Mo23)。

(3) 類似配色 — グラデーション

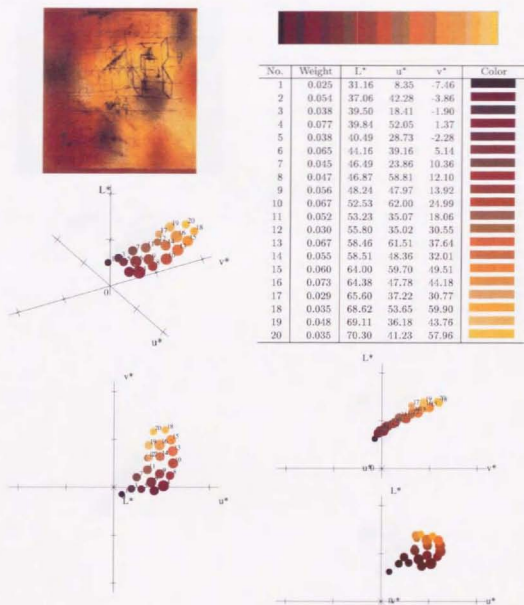


図 4.13: 類似配色 — グラデーションの例 (K30)

図 4.13: P.Klee の『町の前に立つ子どもたち [1928]』(K30) は、色の微妙な変化を用いたグラデーションの好例である。色相として、黄橙から濃赤までの類似色相を用いているので、類似配色ともいえる。なお、近い色相を用いた配色は、グラデーションを伴わなくても、類似配色という。

色分布は、とくに L^*v^* 面図をみるとよくわかるが、ほとんど平面上にのっている。3.1 節 (1) で述べたように、2次元グラデーションであることがよくわかる。このような黄から赤にかけての類似配色は、O.Redon の R01, R11 や、P.Klee の K06, K09, K13、それに梅原の花の作品にも多くみられる。

(4) 補色配色 (コンプリメンタリ, ダイアド)



No.	Weight	L*	u*	v*	Color
1	0.060	29.70	-0.10	0.42	Black
2	0.062	30.98	6.69	1.73	Dark Brown
3	0.018	37.91	14.05	7.66	Dark Red
4	0.059	38.47	3.46	7.43	Dark Orange
5	0.039	43.96	10.00	14.89	Orange
6	0.043	46.15	20.84	14.91	Light Orange
7	0.010	49.96	55.55	18.34	Yellow-Orange
8	0.027	52.75	8.00	14.85	Yellow
9	0.048	53.69	27.15	24.19	Light Yellow
10	0.051	56.57	16.21	23.06	Light Green
11	0.020	62.87	-33.67	34.62	Light Blue
12	0.045	63.10	23.72	30.02	Light Green
13	0.054	66.72	-18.19	-31.33	Light Blue
14	0.019	67.72	2.12	5.75	Light Green
15	0.041	67.82	11.41	17.98	Light Green
16	0.112	71.33	-13.59	-23.21	Light Blue
17	0.068	72.37	-9.14	-14.09	Light Blue
18	0.055	72.55	16.48	26.94	Light Green
19	0.069	80.60	11.38	19.18	Light Yellow
20	0.070	86.64	7.17	11.89	Light Yellow

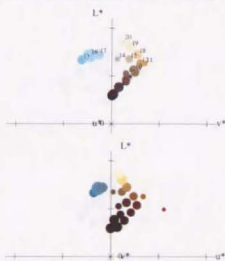
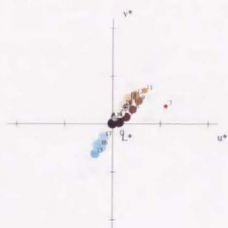
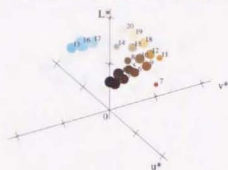


図 4.14: 補色配色の例 (Ut11)

図 4.14: M.Utrillo の“コルシカの教会 [1913 頃]”(Ut11)は、橙と青の反対の色相からなる典型的な補色配色に、一つの赤のアクセントを配したものである (u^*v^* 面図を参照). L^*v^* 面図から、橙系の色相は、白から橙へ至る明清色 (tint) 系列および黒から橙へ至る暗青色 (shade) 系列を組み合わせたカギ型であり、青系の色は中間明度でバランスをとっていることがわかる.

橙と青や、赤と青緑のように対立する 2 色相の組み合わせからなる配色を、補色配色という。コンプリメンタリ (complementary) あるいはダイアド (dyad) ともいう。補色配色の例は多い。とくに O.Redon や M.Utrillo の作品には多くみられる。

(5) 三色配色 (トライアード)

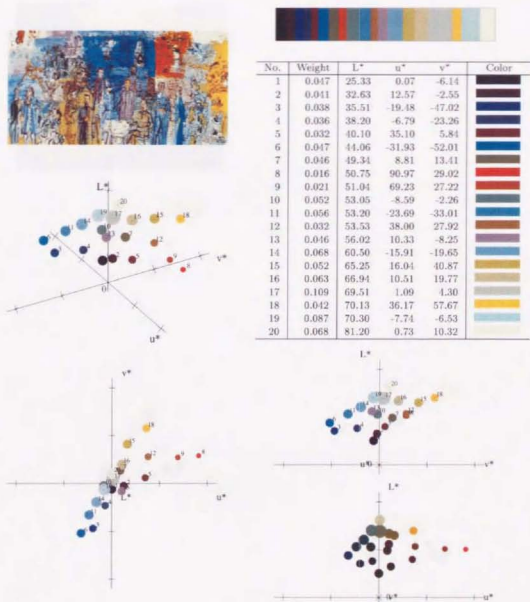


図 4.15: 三色配色の例 (D11)

図 4.15: R.Dufy の“探検者たち [1938]”(D11) は、黄・赤・青の 3 色が目立つ三色配色 (トライアード, triad) の例といっよい。

u^*v^* 面上の色分布は、彩度の高い黄と赤と青の三方向へ伸びており、おおむね 3 色相に分かれることがわかる。このように、相互に離れた 3 色相からなる配色をトライアードという。

なお、3 色で形成される配色に、トリコロール (tri-colore) と呼ばれるものもある。これは、フランスの三色旗のように、三つの色で構成されるが、その中に無彩色を含んでいてもよいものをいう。

三色配色の例は少ない。

(6) 四色配色 (テトラード)

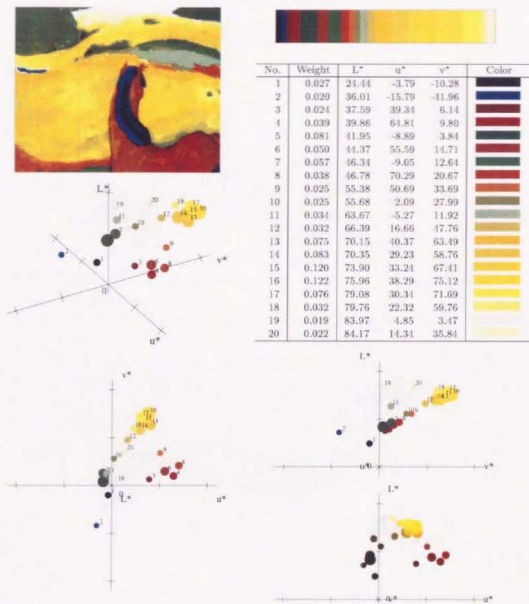


図 4.16: 四色配色の例 (Ma01)

図 4.16: F.Marc の“風景の中の馬 [1910]”(Ma01)は、一目でわかる四色配色 (テトラード, tetrad) の例である。大きい草原の黄、森の緑、馬の赤、タテガミの青という4つの基本色相からなる配色である。

色分布からも、高彩度の黄と赤、中彩度の青、それに低彩度の緑が読みとれる。本論文でとりあげる F.Marc の作品は、ほとんどが四色配色である。

(7) 多色配色 (ポリクローム)

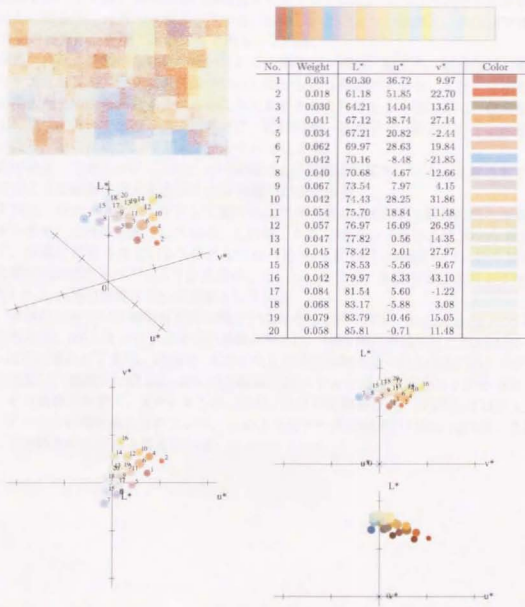


図 4.17: 多色配色の例 (K23)

図 4.17: P.Klee の「ポリフォニー [1932]」(K23) は、作品名のごとく、明るい多数の色が織りなす配色であり、多色配色 (ポリクローム, polychrome) と呼んでよいものの例である。 u^*v^* 面上の色分布は、ほぼすべての色相を網羅したユニークな形である。

多色配色は、この例とは違って、彩度の高いコントラストの強いものや、他の単純な配色の組み合わせであることもあり、配色構造を特定する名前とはいいたくない。

4.3 データソースにかかわる問題

本論文の色彩分析では、画集あるいは展覧会のカタログなどからカラーレスキャナを用いて取り込んだ画像を、分析の対象としている。しかし、このような画像は、美術館や博物館で見る本物の絵画作品とは、次の二点で異なっている。

第一点は、作品の物理的な性質の違いである。本物は、画布、絵の具、額縁などの影響もあり、マチエ（材質感）やタッチ（筆づかい）などもより印象的である。また、寸法も身長を超える巨大なものからハガキ大の小さなものまでまちまちである。第二点は、作品を鑑賞するときの環境の違いである。美術館等では、比較的暗い照明下で、あるていどの距離をおいて眺めたり、時には近づいてディテールをみたりする。

分析の対象は、できるかぎり本物に近い画像および視環境が望ましいことは言うまでもないが、そのような実験条件を整えることは至難のわざである。

本論文では、カラーレスキャナを介して取り込んだ画素数およそ数百×数百の離散画像の測色的なデータを、分析の対象としている。これは、かなり明るい（たとえば1000lx程度の）照明下で、画集に採録されているていどの寸法（数cm×数cm）の額縁のない絵を眺める、といった視環境が想定されていることを意味している。つまり、本論文ではこのような条件下でも失われない美的情報を分析の対象としている。

近年、美術作品あるいは博物館資料の電子的な保存を目的とする“digital archive”が構築されつつある[68, 69]。ヨーロッパ連合の援助のもとに、1989年に開始されたVASARIプロジェクトはその草わけである。絵画を、6チャンネルの分光情報を取り込むVASARIスキャナを用いて走査し、最終的には20k×20kの各画素に対し $L^*a^*b^*$ 色値を求める大がかりなものである。その後数年を経て、3チャンネルのMARCカメラが開発され、MARCプロジェクトとして、データの収集が進められている。このようなデータの利用が可能となれば、これを対象として分析を試みたいと考えている。

5 色分布の類似性に基づく絵画の分類

4章では、絵画の色彩的特徴が構成色の色空間上の分布に現われることを見た。

色彩的特徴の似た絵画は、色分布も似ているであろう。色分布の似ている似ていないで絵画を分類すること、および作品群間の近隣関係を見出すことが、この章の目標である。

代表色画像の色分布は、3章で述べたように、離散分布である。したがって、離散分布間の距離がわかれば、絵画の分類ができることになる。

筆者は、離散分布間の距離について、いくつかの文献[70など]を調査したが、適切な距離の定義を見出すことはできなかった。そこで、色空間の量子化を行ない、ベクトル間の距離を類似度として絵画の分類[71]およびデザイン画の分類[38]を試みた。また、Gauss関数により離散分布を連続化し、連続関数間の距離を類似度として、やはり絵画の分類[13]を行なった。いずれの場合も、色彩的印象にあう分類結果が得られたが、結果が類似度を定めるパラメータに依存するという問題があることもわかった。

この章ではまず、この問題を明らかにする。つぎに、離散分布間の距離を定義する。そして、この距離を色分布間の類似度とし、絵画の分類および作品群間の類似性の分析を行なう。さいごに、色分布間の類似度に基づく画像検索の問題について考察する。

5.1 色分布間の類似度の定め方に関する問題

(1) 色空間の量子化における問題点

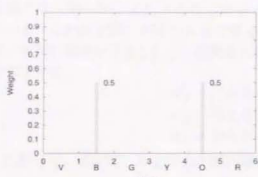
色空間を、色分布に依存しない方法で(たとえば、均等格子状に)分割することを、色空間の‘量子化’とよぶ。量子化により分割された小領域ごとに、そこに含まれる色の重みを集計すれば、色分布は重みベクトル(ヒストグラム)で近似される。したがって、この重みベクトル間の距離で色分布間の類似度を表わすことができる。

しかし、重みベクトル間の距離は、分割の精粗により必ずしも色分布間の類似性と相関しないことが起こる。このことを、簡単な例を用いて説明しよう。

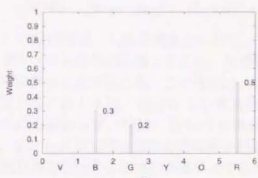
色を、簡単のため1次元で表わすことにし、横軸に色、縦軸に重みをとり、色分布をグラフで表わすことにする。さて、図5.1の(a), (b), (c)に示す三つの色分布 A, B, C を考える。

これらの色分布は、3.2節で示したように色と重みの組の集合で表わせば、次のように書ける。

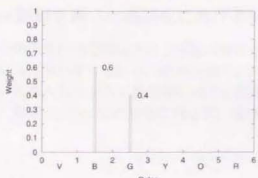
- (a) $A = \{(1.5, 0.5), (4.5, 0.5)\}$,
- (b) $B = \{(1.5, 0.3), (2.5, 0.2), (5.5, 0.5)\}$,
- (c) $C = \{(1.5, 0.6), (2.5, 0.4)\}$.



(a) 色分布 A



(b) 色分布 B



(c) 色分布 C



図 5.1: 三つの色分布 A, B, C

色空間(横軸)を、刻み幅1とし0,1,2,...,6で分割し、各色分布を6次元の重みベクトルで近似すると、

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_A &= [0, 0.5, 0, 0, 0.5, 0], \\ \mathbf{w}_B &= [0, 0.3, 0.2, 0, 0, 0.5], \\ \mathbf{w}_C &= [0, 0.6, 0.4, 0, 0, 0] \end{aligned}$$

となる。ここで、色分布 AB 間、および BC 間の類似度を、重みベクトル間のユークリッド距離で測れば、

$$\begin{aligned} AB \text{ 間: } \|\mathbf{w}_A - \mathbf{w}_B\| &= \{(0.2)^2 + (-0.2)^2 + (0.5)^2 + (-0.5)^2\}^{1/2} = 0.76, \\ BC \text{ 間: } \|\mathbf{w}_B - \mathbf{w}_C\| &= \{(-0.3)^2 + (-0.2)^2 + (0.5)^2\}^{1/2} = 0.62 \end{aligned}$$

を得る。目視では、明らかに A と B のほうが B と C より似ているにもかかわらず、類似度は逆転している。これは納得しがたいことである。

こんどは、分割の刻み幅を 2 とし、横軸を 0, 2, 4, 6 で分割し、各色分布を 3 次元の重みベクトルで近似すると、

$$\begin{aligned} \mathbf{w}'_A &= [0.5, 0, 0.5], \\ \mathbf{w}'_B &= [0.3, 0.2, 0.5], \\ \mathbf{w}'_C &= [0.6, 0.4, 0] \end{aligned}$$

となる。したがって、 AB 間、および BC 間の類似度は、

$$\begin{aligned} AB \text{ 間: } \|\mathbf{w}'_A - \mathbf{w}'_B\| &= \{(0.2)^2 + (-0.2)^2\}^{1/2} = 0.28, \\ BC \text{ 間: } \|\mathbf{w}'_B - \mathbf{w}'_C\| &= \{(-0.3)^2 + (-0.2)^2 + (0.5)^2\}^{1/2} = 0.62 \end{aligned}$$

となった。この類似度は、人間の感覚とも合う。

類似度を重みベクトル間の距離とすると、色空間の分割の仕方すなわち量子化のパラメータに依存して不自然なことが起こる。この理由は、色空間における距離が類似度に反映されていないからである。たとえば、色分布 A の構成色である橙と色分布 B の構成色である赤は近い色であるにも関わらず、“近い” という情報が色分布をベクトル化したときに失われたからである。ヒストグラムは分布の密度関数を近似するものであり、ほんらいの密度関数をもたない離散分布を近似するには向かないのである。

(2) Gauss 関数を用いた連続化における問題

色分布間の類似度に色空間における距離の情報を取り入れる方法として、離散分布を連続分布で近似する方法が考えられる。連続分布であれば、色空間のほとんど至るところで連続な密度関数が定められるから、色空間における距離が関数の連続性に反映できるのである。

たとえば、前項 (1) の三つの分布に対して、標準偏差 $\sigma = 0.7$ の Gauss 関数

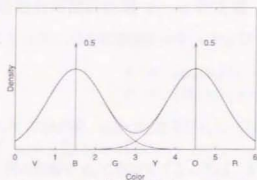
$$g(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right)$$

を用いて近似した連続分布を図 5.2 に示す。

このように、連続な密度関数で表わされた色分布間の類似度として、密度関数の差の L_2 距離を採用することにすれば、

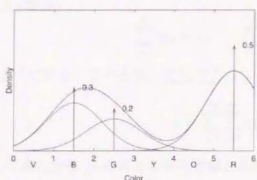
$$\begin{aligned} AB \text{ 間: } \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} |f_A(y) - f_B(y)|^2 dy \right\}^{1/2} &= 0.116, \\ BC \text{ 間: } \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} |f_B(y) - f_C(y)|^2 dy \right\}^{1/2} &= 0.170 \end{aligned}$$

となる。これは、視感とも合う結果である。しかし、この場合も、結果は連続化のパラメータによることになる。極端な例として、非常に小さい σ をとれば、前項で述べた重みベクトルの次元を大きくした場合に近くなり、視感と合わないことが起こる。($\sigma \rightarrow 0$ とすれば、超関数の意味で密度関数は δ 超関数に収束する。) また、離散的な色分布を連続化する根拠に乏しいこと、Gauss 関数の定義域は 3 次元では \mathbf{R}^3 全体であり、色の存在範囲をはるかに越えていること、など不自然なことも多い。



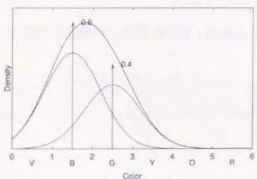
(a) 分布密度 f_A

$$f_A(y) = 0.5g(y - 1.5) + 0.5g(y - 4.5).$$



(b) 分布密度 f_B

$$f_B(y) = 0.3g(y - 1.5) + 0.2g(y - 2.5) + 0.5g(y - 5.5).$$



(c) 分布密度 f_C

$$f_C(y) = 0.6g(y - 1.5) + 0.4g(y - 2.5).$$

図 5.2: 三つの分布密度 f_A, f_B, f_C

5.2 離散分布間の距離

代表色画像の色分布は、色空間に散在する色に対して、それぞれの重みを付与したものである。数学的にいえば、色分布は、色空間という距離空間の有限個の点(色)に、それぞれの重みが与えられた離散分布 [70] である。以下に、一般の有限離散分布間の距離を定義する。

(1) 有限離散分布間の距離 $d(\cdot, \cdot)$ の定義

距離空間 X 上の二つの有限離散分布 A および B を、次のように表わす。

$$\begin{aligned} A &= \{(a_i, u_i) \mid i = 1, \dots, M\}, \\ B &= \{(b_j, v_j) \mid j = 1, \dots, N\}. \end{aligned}$$

ここに、 M, N は自然数、 $u_i (> 0)$ および $v_j (> 0)$ は、それぞれ X の点 a_i および b_j の重みである ($\sum_{i=1}^M u_i = \sum_{j=1}^N v_j = 1$)。

2点 a_i, b_j 間の距離を d_{ij} で表わす。(たとえば、 X にノルムが定義されているならば、 $d_{ij} = \|a_i - b_j\|$ などとする。) a_i の重み u_i の一部 $x_{ij} (\geq 0)$ を b_j の重み v_j の一部に割り当てることにし (図 5.3 参照)。

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = u_i, \quad \sum_{i=1}^M x_{ij} = v_j \quad (5.1)$$

が成り立つようにする。このとき、 $\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} = 1$ が成り立つことに注意すれば、

$$x = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} d_{ij} \quad (5.2)$$

は、分布 A の点と分布 B の点との平均距離とみなすことができる。ここで、 x_{ij} をうまく選び x を最小化するならば、

$$d(A, B) = \min_{x_{ij}} x \quad (5.3)$$

は、分布 A, B 間の (距離の公理を満たす) 距離となる。

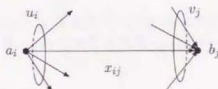


図 5.3: 重み x_{ij} の割り当て

条件 (5.1) のもとで (5.2) を最小化する問題 (5.3) は、線形計画法の一つである輸送問題とみなせる。 d_{ij} がコスト、 x_{ij} が輸送量に相当する。輸送問題に対しては、効率の良い解法が知られている [72]。 X を色空間、 A, B を二つの画像の構成色の色分布 (u_i, v_j はそれぞれ色 a_i, b_j の相対面積)、 d_{ij} を色 a_i, b_j の色差とするならば、 $d(A, B)$ は、二つの構成色集合 $\{a_1, \dots, a_M\}$ および $\{b_1, \dots, b_N\}$ の対応をうまく定めたときの、最小平均色差を表わすことになる。これで、意味の明解な色分布間の距離が求まった。

(2) $d(\cdot, \cdot)$ が距離であることの証明

距離空間 X 上の任意の有限離散分布 A, B, C に対し、距離の公理

$$i) d(A, B) = 0 \Leftrightarrow A = B.$$

$$\text{ii) } d(A, B) = d(B, A).$$

$$\text{iii) } d(A, B) + d(B, C) \geq d(A, C).$$

が満たされることを証明する。

以下、 X 上の有限離散分布 A, B, C を

$$A = \{(a_i, u_i) \mid i = 1, 2, \dots, M\},$$

$$B = \{(b_j, v_j) \mid j = 1, 2, \dots, N\},$$

$$C = \{(c_k, w_k) \mid k = 1, 2, \dots, L\}$$

と表わす。ここに、 $a_i (i = 1, 2, \dots, M)$ は相異なる X の点、 $u_i (i = 1, 2, \dots, M)$ は点 a_i の重み ($\sum_{i=1}^M u_i = 1, u_i > 0$) である。同様に、 $b_j (j = 1, 2, \dots, N)$ は相異なる X の点、 $v_j (j = 1, 2, \dots, N)$ は点 b_j の重み ($\sum_{j=1}^N v_j = 1, v_j > 0$) であり、 $c_k (k = 1, 2, \dots, L)$ は相異なる X の点、 $w_k (k = 1, 2, \dots, L)$ は点 c_k の重み ($\sum_{k=1}^L w_k = 1, w_k > 0$) である。

a) $A = B \Rightarrow d(A, B) = 0$ の証明

$A = B$ であるとき、 $M = N$ 、かつ $i = 1, \dots, M$ に対して $a_i = b_i, u_i = v_i$ としてよい。 $i = 1, \dots, M$ に対して $x_{ii} = u_i = v_i$ とおき、 $i \neq j$ である $i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N$ に対して $x_{ij} = 0$ とおくと、

$$\begin{aligned} x &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} d_{ij} \\ &= \sum_{i=1}^M x_{ii} d_{ii} = 0. \quad (\because d_{ii} = 0) \end{aligned}$$

一方、 $\sum_{j=1}^M x_{ij} = u_i, \sum_{i=1}^M x_{ij} = v_j$ をみたま $x_{ij} (\geq 0)$ に対しては $x = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M x_{ij} d_{ij} \geq 0$ であるから、上記の $x = 0$ は、 $\min_{x_{ij}} x$ を与える。したがって $d(A, B) = 0$ 。

b) $d(A, B) = 0 \Rightarrow A = B$ の証明

$d(A, B) = 0$ から、

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = u_i \quad (i = 1, \dots, M), \quad \sum_{i=1}^M x_{ij} = v_j \quad (j = 1, \dots, N)$$

を満たし、かつ

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} d_{ij} = 0,$$

なる $x_{ij} (\geq 0)$ が存在する。 $x_{ij} > 0$ なる (i, j) に対しては $d_{ij} = 0$ でなければならない。

一方、各 $i = 1, \dots, M$ に対し、 $\sum_{j=1}^N x_{ij} = u_i > 0$ であるから、少なくとも一つの j について、 $x_{ij} > 0$ 。このとき、 $d_{ij} = 0$ 、すなわち、 a_i と b_j 間の距離 $= 0$ であるから $a_i = b_j$ 。他に $x_{i'j'} > 0$ なる $j' \neq j$ があるとすれば、その j' についても $d_{i'j'} = 0$ 。したがって $a_i = b_{j'}$ 。これから $b_j = b_{j'}, j' \neq j$ 。これは矛盾である。したがって、一つの i に対し、 $x_{ij} > 0$ なる j は唯一定まり、その j に対し $a_i = b_j$ 。しかも $u_i = v_j$ となる。すべての $i = 1, \dots, M$ についてこのことが成立する。そして $N = M$ とならねばならない。ゆえに $A = B$ 。

c) $d(A, B) = d(B, A)$ の証明

空間 X における距離の性質から, $d_{ij} = d_{ji}$ であるから, $x'_{ji} = x_{ij}$ とおけば

$$d(A, B) = \min_{x_{ij}} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} d_{ij} = \min_{x'_{ji}} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M x'_{ji} d_{ij} = d(B, A).$$

d) $d(A, B) + d(B, C) \geq d(A, C)$ の証明

条件

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = u_i \quad (i = 1, \dots, M) \quad \text{および} \quad \sum_{i=1}^M x_{ij} = v_j \quad (j = 1, \dots, N)$$

を満たし,

$$x = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} d_{ij}$$

を最小化する $x_{ij} (\geq 0) (i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N)$ を \hat{x}_{ij} と書く. また, 条件

$$\sum_{k=1}^L y_{jk} = v_j \quad (j = 1, \dots, N) \quad \text{および} \quad \sum_{j=1}^N y_{jk} = w_k \quad (k = 1, \dots, L)$$

を満たし,

$$y = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^L y_{jk} d_{jk}$$

を最小化する $y_{jk} (\geq 0) (j = 1, \dots, N, k = 1, \dots, L)$ を \hat{y}_{jk} と書く.

各 $j = 1, \dots, N$ に対し,

$$I_j = \{i \mid \hat{x}_{ij} > 0\} \quad \text{および} \quad K_j = \{k \mid \hat{y}_{jk} > 0\}$$

は, いずれも空とならないことは明らか. そこで,

$$u_i^{(j)} = \hat{x}_{ij} / v_j \quad (i \in I_j) \quad \text{および} \quad w_k^{(j)} = \hat{y}_{jk} / v_j \quad (k \in K_j)$$

とおき ($\sum_{i \in I_j} u_i^{(j)} = \sum_{k \in K_j} w_k^{(j)} = 1$),

$$A_j = \{(a_i, u_i^{(j)}) \mid i \in I_j\} \quad \text{および} \quad C_j = \{(c_k, w_k^{(j)}) \mid k \in K_j\}$$

を考えると, これらはいずれも X 上の有限離散分布となる (図 5.4 参照).

ここで, 各 $j = 1, \dots, N$ に対し, さらに

$$\sum_{k \in K_j} z_{ik}^{(j)} = u_i^{(j)} \quad (i \in I_j) \quad \text{および} \quad \sum_{i \in I_j} z_{ik}^{(j)} = w_k^{(j)} \quad (k \in K_j)$$

を満たし,

$$z = \sum_{i \in I_j} \sum_{k \in K_j} z_{ik}^{(j)} d_{ik}$$

を最小化する $z_{ik}^{(j)} (\geq 0)$ ($i \in I_j, k \in K_j$) を $\hat{z}_{ik}^{(j)}$ と書き、空間 X における距離の性質から $d_{ik} \leq d_{ij} + d_{jk}$ であることに注意すると

$$\begin{aligned} d(A_j, C_j) &= \sum_{i \in I_j} \sum_{k \in K_j} \hat{z}_{ik}^{(j)} d_{ik} \\ &\leq \sum_{i \in I_j} \sum_{k \in K_j} \hat{z}_{ik}^{(j)} (d_{ij} + d_{jk}) \\ &= \sum_{i \in I_j} \sum_{k \in K_j} \hat{z}_{ik}^{(j)} d_{ij} + \sum_{k \in K_j} \sum_{i \in I_j} \hat{z}_{ik}^{(j)} d_{jk} \\ &= \sum_{i \in I_j} u_i^{(j)} d_{ij} + \sum_{k \in K_j} w_k^{(j)} d_{jk} \end{aligned}$$

が成立つ。 $u_i^{(j)}$ および $w_k^{(j)}$ の定義を思い起こし、上記不等式の両辺に v_j を掛ければ、

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{k \in K_j} \hat{z}_{ik}^{(j)} v_j d_{ik} \leq \sum_{i \in I_j} \hat{x}_{ij} d_{ij} + \sum_{k \in K_j} \hat{y}_{jk} d_{jk}$$

を得る。さらに、 $j = 1, \dots, N$ につき両辺の和を作ると

$$\sum_{j=1}^N \sum_{i \in I_j} \sum_{k \in K_j} \hat{z}_{ik}^{(j)} v_j d_{ik} \leq \sum_{j=1}^N \sum_{i \in I_j} \hat{x}_{ij} d_{ij} + \sum_{j=1}^N \sum_{k \in K_j} \hat{y}_{jk} d_{jk}.$$

ここで、各 j について、 $\hat{z}_{ik}^{(j)}$ の定義域をすべての $i = 1, \dots, M$ および $k = 1, \dots, L$ に広げることとし、

$$\hat{z}_{ik}^{(j)} = 0 \quad (i \notin I_j, k \notin K_j)$$

とおく。 I_j, K_j の定義から、 $i \notin I_j$ に対して $\hat{x}_{ij} = 0$ および $k \notin K_j$ に対して $\hat{y}_{jk} = 0$ であることに注意すると、上の不等式は

$$\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^L \left(\sum_{j=1}^N \hat{z}_{ik}^{(j)} v_j \right) d_{ik} \leq \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \hat{x}_{ij} d_{ij} + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^L \hat{y}_{jk} d_{jk}.$$

と変形できる。この右辺は、 $d(A, B)$ と $d(B, C)$ の和である。したがって、左辺の括弧内を

$$\sum_{j=1}^N \hat{z}_{ik}^{(j)} v_j = z_{ik}$$

とおくと、

$$\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^L z_{ik} d_{ik} \leq d(A, B) + d(B, C).$$

$d(A, C)$ は、上記左辺の最小値であることから

$$d(A, C) \leq d(A, B) + d(B, C)$$

が得られる。なお、図 5.4 を参照。

以上 a), b), c), d) により、 $d(\cdot, \cdot)$ が距離であることが証明された。

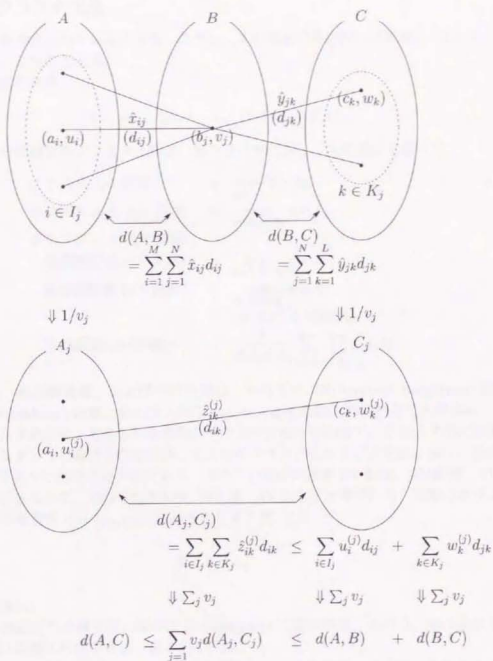


図 5.4: $d(A, B) + d(B, C) \geq d(A, C)$ の証明

5.3 絵画作品の階層的クラスタ分析

集合の要素間に、距離ないし類似度のみが定義されている場合の要素の分類には、階層的クラスタ化法 [73] がよく用いられる。階層的クラスタ化法を用いた分析は、階層的クラスタ分析と呼ばれている。この節では、離散色分布間の距離にもとづいて、絵画作品の階層的クラスタ分析を行なう。

ここで、階層的クラスタ化法のアルゴリズムとその性質について、簡単にまとめておく。

(1) 階層的クラスタ化法

有限集合 A が与えられているとする。ただし、 A の任意の要素間には距離 $d: A \times A \rightarrow \mathbb{R}$ が定義されているものとする。

A の適当な直和分割

$$A = A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_K \quad (1 \leq K \leq \#A)$$

において、各分割成分をクラスタと呼ぶ。各クラスタに対し、次の量を定義する：

$$\begin{aligned} \text{クラスタ } A_i \text{ の直径} &= \max_{a, b \in A_i} d(a, b). \\ \text{クラスタ } A_i \text{ と } A_j \text{ の間隔} &= \min_{a \in A_i, b \in A_j} d(a, b). \\ \text{クラスタ } A_i \text{ と } A_j \text{ の距離:} & \\ \text{最遠隣距離 (FN 距離)} &= \max_{a \in A_i, b \in A_j} d(a, b). \\ \text{最近隣距離 (NN 距離)} &= \min_{a \in A_i, b \in A_j} d(a, b) \\ & \quad (= A_i \text{ と } A_j \text{ の間隔}). \\ \text{平均距離 (AV 距離)} &= \frac{1}{\#A_i \#A_j} \sum_{a \in A_i} \sum_{b \in A_j} d(a, b). \end{aligned}$$

最遠隣距離、最近隣距離、および平均距離は、それぞれ FN (Furthest Neighbour) 距離、NN (Nearest Neighbour) 距離、および AV (Group Average) 距離と称されることが多い。

階層的クラスタ化法は、与えられた初期のクラスタ分割から始めて、クラスタ間の距離の最も近いクラスタ 2 つを選びそれを合併して 1 つのクラスタにすることを繰り返す、最終的には 1 つのクラスタに統合する方法である。クラスタ間の距離を FN 距離、NN 距離、AV 距離などのどれにとるかで、それぞれ FN 法、NN 法、AV 法などと呼ばれる。初期のクラスタ分割は、もとの集合を $A = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ とするとき、

$$A = \bigcup_{i=1}^N \{a_i\}$$

とすることが多い。

クラスタが形成される様子は、樹形図 (dendrogram) に書かれる。ふつう、木の葉から根に向かう方向に距離の尺度をとる。図 5.5 を参照。

木を適当な距離 $\delta (> 0)$ で切断して得られる部分木は、その距離までで結合されたクラスタを表わす。たとえば図 5.5 では、木を距離 15 で切断すると $C_1 = \{a, b\}$ と $C_2 = \{c, d, e\}$ という二つのクラスタが得られる。

木を距離 δ で切断したとき得られる各クラスタについて、次の性質が成り立つ。

- FN 法では、各クラスタの直径はいずれも δ 以下である。
- NN 法では、各クラスタ間の間隔はいずれも δ 以上である。

FN 法は、各クラスタのまとまりをよくするときに用いられるが、クラスタ間の分離はよくなるとは限らない。また NN 法は、各クラスタ間の分離をよくするときに用いられるが、クラスタのまとまりはよくなるとは限らない。AV 法は、両者の中間の性質をもつ。

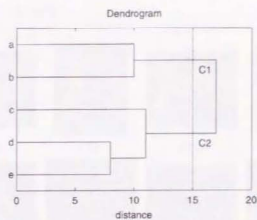


図 5.5: 階層的クラスタ化法の樹形図

(2) Caravaggio, M.Utrillo, F.Marc の 3 作品群に対する分析

Caravaggio, M.Utrillo, および F.Marc の三つの作品群 C, Ut, Ma の計 50 作品すべてからなる集合に対し、階層的クラスタ分析を行なった。クラスタ間の距離として FN 法を用いて作成した樹形図を、図 5.6 に示す。

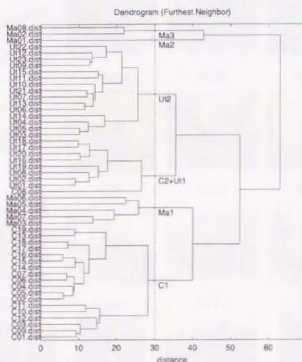


図 5.6: 絵画群 C+Ut+Ma の階層的クラスタ化法による樹形図

色分布間の距離の短いものから結合し、クラスタを構成していく様子が示されている。距離 30 では、六つのクラスタ C_1 , Ma_1 , Ut_1+C_2 , Ut_2 , Ma_2 , Ma_3 が作られている。この各クラ

スタに属する作品を図 5.7 に示す.



図 5.7: 絵画群 C+Ut+Ma の分類結果



図 5.7: 絵画群 C+Ut+Ma の分類結果 (つづき)

Caravaggio の作品は、1 作品 C08 を除いた 18 作品がクラスタ C_1 に集まっている。M.Utrillo の作品は、黄みがかっているか青みがかっているかで、それぞれクラスタ U_1 と U_2 に分かれている。先の除かれた作品 C08 は、 U_1 と同じクラスタに現われているが、納得の行く結果である。F.Marc の作品は、三つのクラスタ Ma_1 、 Ma_2 、 Ma_3 に分かれているが、それは色使いの違いによることわかる。この結果は、色分布を連続化して行った以前の分類結果 [13] とほとんど同じである。

(3) FN 法の問題点と前処理つき FN 法 = ND-FN 法について

Caravaggio, M.Utrillo, F.Marc を含む 10 人の画家の作品群計 183 作品すべてについて、FN 法によりクラスタ分析を行なった。得られた樹形図を図 5.8 に示す。この樹形図を距離 30 で切断すると、18 のクラスタが得られた。結果はおおむね良好であるが、距離が近いにもかかわらず別のクラスタに分離されるものも見受けられた。じっさい、各クラスタ間の間隔を調べてみると、

最小間隔:	6.91
最大間隔:	72.49
平均間隔:	31.75
標準偏差:	13.97

となり、クラスタ間の最小間隔が 6.91 と極めて小さい値を示した。

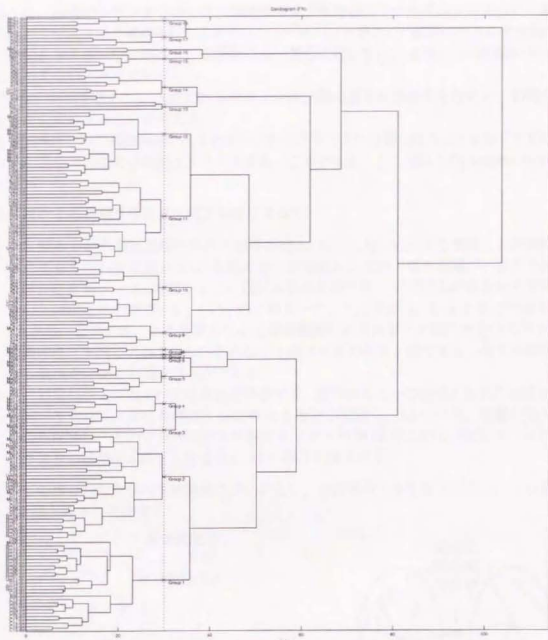


図 5.8: 図 1: 10 人の作品群の階層的クラスタ分析による樹形図

このようにクラスタの分離が悪い原因は、色分布間の距離の定義に問題があるのではなく、階層的クラスタ分析の方法そのものに原因がある。

第一に、FN 法では、樹形図をある距離 δ で切断して得られるクラスタに対し、各クラスタの直径が δ 以下になる性質があるが、各クラスタ間の間隔がある一定値以上になるという保障はないのである。すなわち、直径が δ 以下になるようにクラスタ分割できたとしても、各クラスタの分離が極めて悪くなる可能性がある。

第二に、階層的クラスタ分析では、逐次クラスタを統合していくアルゴリズムに、集合全体をみてクラスタの再構成を行なうようなフィードバックがなく、初期のクラスタ分割が後々まで影響を与える。したがって、要素数の多い集合に対しては、よほどよい初期のクラスタ分割を与えないとうまくいかない。

FN法の利点を生かし、欠点であるクラスタの分離の悪さを改善するために、初期クラスタをうまく構成することを考える。

ある要素からみて最短距離にある要素が、別のクラスタに分類されることを防ぐために、以下のアルゴリズムにより初期クラスタを作る。この方法を、ここではND(Nearest Distance)法と呼ぶ。

〈ND法による初期クラスタ生成アルゴリズム〉

- i) ある要素 a から最短距離にある a 以外の点 b_1, b_2, \dots, b_n ($n \geq 1$) を探す。この最短距離がある与えられた定数 $\varepsilon (> 0)$ を越えるときは何もしない。最短距離が ε 以下であるならば、 a と b_1, \dots, b_n の間にすでに辺があるかを調べる。すでに辺があるときは何もしない。辺がないときは、 b_1, \dots, b_n のどれか一つ、たとえば b_1 と a とを辺で結ぶ。(図 5.9 参照。図中では、ある要素からみて最短距離にある要素へ有向辺を引いてある。) この操作を、すべての要素について行なうと森 (=木の集合) ができる。各木の要素からなる集合を、仮の初期クラスタとする。
- ii) 仮の初期クラスタのすべての直径を計算する。直径がもう一つの与えられた定数 $\delta (> \varepsilon)$ を越える場合は、直径を構成する要素 a, b を結ぶ経路 (path) の中で、距離が最大である辺を削除し、そのクラスタを 2 分割する。(図 5.10 参照。) このようにして、すべてのクラスタの直径が δ 以下となるまで ii) の操作を繰り返す。

こうして作られたクラスタを初期クラスタとし、以後通常の FN 法を行なう。この方法を ND-FN 法と呼ぶことにする。

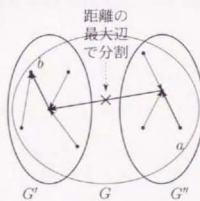
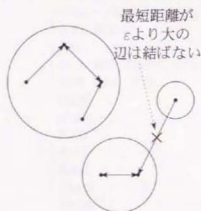


図 5.9: 最短距離の関係によって作られたクラスタ 図 5.10: 直径が δ を越えるクラスタを 2 つに分ける方法

先の 10 人の画家の作品 183 点について、ND-FN 法を適用してみる。まず、 $\varepsilon = 20$, $\delta = 30$ として ND 法を適用したところ、表 5.1 に示す 45 クラスタからなる初期のクラスタ分割が得られた。

表 5.1: ND 法による初期クラスタ

初期クラスタ	初期クラスタの要素
A001	C15, C16, C14
A002	C02, C05
A003	C04, C06, C07, C13, Rm05, Rm13, Rm15, Rm17, Rm20, K08, Um03, Um08
A004	C17, C18
A005	C19, Rm09, Rm10, Rm11, Rm12, Rm14, Rm19, D13
A006	C01, C03, C09, C12, K04, K05
A007	C10, C11, Rm06, Rm07, Rm16, Rm18, Mo18, Mo19, Ma04
A008	C08, R01, K02, K06, K07, K13, K17, K20, K22, K27, Ki02
A009	Rm02, R07, R14, Mo13, Mo14, D01, D03, K14, Um01, Um12
A010	R16, R17, D02, Um05
A011	D06, Ut01, Ut02, Ut04, Ut08, Ut11
A012	D04, D05
A013	Rm04, Rm08, Mo06, D08, Um11
A014	D11, Ma06
A015	D17
A016	D12, K29, Ut09, Ut12, Ut16, Ut20, Ut22, Ut23
A017	D10
A018	Mo09, Mo11, Mo12, Mo15, D07
A019	D09, D14, D15
A020	Mo10, Mo17, D16
A021	K16, Ma03, Ma07, Ki01, Ki09
A022	R05, R06, R13, Mo20, Mo22, K19, K21, Ut03, Ut05
A023	K01, K10, K12, K23
A024	K24, K25, Um02, Um06
A025	Mo24, K11
A026	K09, K15, Um07, Um10
A027	R09, Mo02, Mo03, Mo04, Mo07, Mo16, K28
A028	R04, R18, R19, Mo05, K03, Ut06, Ut07, Ut10, Ut13, Ut14, Ut15, Ut21, Um04
A029	K26, K30
A030	K18
A031	R02, R11, Um09, Ki04
A032	R03, Ki03, Ki10
A033	Ki06
A034	Ki05
A035	Ki07
A036	Ki11
A037	Ki08
A038	Ma02
A039	Ma08
A040	Ma05
A041	Ma01
A042	R10, R12, R15, Mo08
A043	Mo01, Mo21, Mo23
A044	R08, Ut17, Ut18, Ut19
A045	Rm01, Rm03

つぎに、得られた初期クラスタに対して FN 法を適用したところ、図 5.11 に示す樹形図が得られた。距離 $\delta = 30$ では、20 クラスタが得られる。各クラスタに属する作品の色分布を、図 5.12 に色帯 (カラーバー) の形で示す。

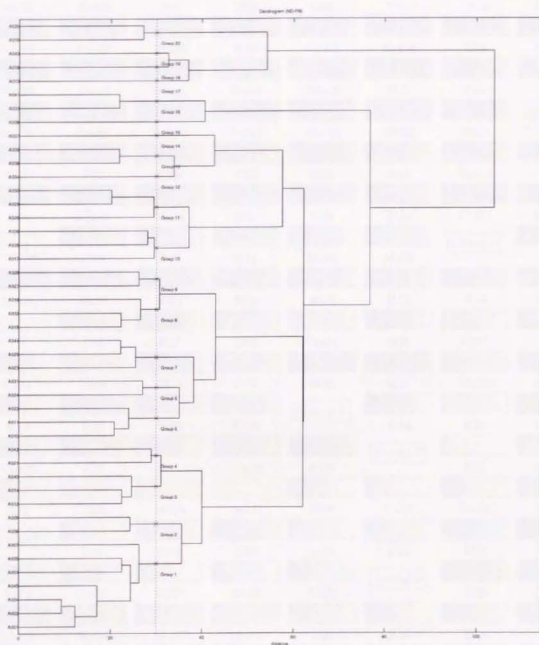


図 5.11: ND-FN 法による樹形図



図 5.12: 10 人の画家の作品 183 点の ND-FN 法による分類結果

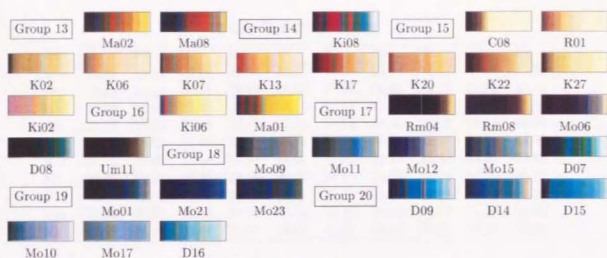


図 5.12: 10 人の画家の作品 183 点の ND-FN 法による分類結果 (つづき)

このクラスタについて、各クラスタ間の間隔を調べたところ、

最小間隔: 19.44
 最大間隔: 87.26
 平均間隔: 42.15
 標準偏差: 12.82

のようになり、クラスタ間の最小間隔、最大間隔、平均間隔ともに、単なる FN 法に比べ大幅に増加した。すなわち、クラスタ間の分離が改善されたことが確認される。

5.4 作品群間の類似度分析

この節では、個々の絵画間の類似性ではなく、画家の作品群間の類似性の分析を行なう。

画像の色分布間の距離にもとづき、作品群間の類似度を次のように定義する。二つの作品群 A および B の色分布の集合を、それぞれ $\{A_1, \dots, A_m\}$ および $\{B_1, \dots, B_n\}$ とし、色分布 A_i と B_j 間の距離を $d(A_i, B_j)$ と書くとき、 A と B の類似度を、いわゆる群間平均距離

$$s_{A,B} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d(A_i, B_j)$$

によって定義する。また A 自身の類似度を、いわゆる群内平均距離

$$s_{A,A} = \frac{2}{m(m-1)} \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m d(A_i, A_j)$$

によって定義する。

10 人の画家、Caravaggio, Rembrandt, O.Redon, C.Monet, R.Dufy, P.Klee, F.Marc, M.Utrillo, 梅原、および木村の作品群について上記の計算を行ない、作品群間の類似度をマトリックスに表わしたものが表 5.2 である。表の各項目の数値は、小さいほど類似度が高い、すなわちよく似ていることを表わす。

表 5.2: 作品群間の類似度

dist.	C	Rm	R	Mo	D	K	Ma	Ut	Um	Ki
C	16.89	16.12	31.96	31.97	36.71	39.25	33.94	34.57	27.97	43.59
Rm	16.12	12.14	31.09	29.64	35.83	37.99	34.28	34.19	27.03	44.12
R	31.96	31.09	23.96	28.40	35.40	31.18	33.36	22.87	28.46	35.64
Mo	31.97	29.64	28.40	26.90	33.44	37.54	37.30	26.72	31.89	41.39
D	36.71	35.83	35.40	33.44	36.94	43.96	39.01	33.37	37.05	44.00
K	39.25	37.99	31.18	37.54	43.96	33.80	38.10	31.34	33.21	38.86
Ma	33.94	34.28	33.36	37.30	39.01	38.10	30.84	35.23	31.29	35.75
Ut	34.57	34.19	22.87	26.72	33.37	31.34	35.23	16.89	28.74	36.39
Um	27.97	27.03	28.46	31.89	37.05	33.21	31.29	28.74	27.56	37.28
Ki	43.59	44.12	35.64	41.39	44.00	38.86	35.75	36.39	37.28	38.52

まず、各作品群間の遠近を、次のようにしてグラフ化してみる。

作品群 A からみて最も類似度が高い（距離が短い）作品群を B とするとき、点 A から点 B へ実線の有向辺を書く。A からみて 2 番目に類似度の高い作品群を C とするとき、点 A から点 C へ破線の有向辺を書く。矢線には、いずれの場合も類似度を添える。

図 5.13 は、このようにして作品群間の近隣関係をグラフ化したものである。

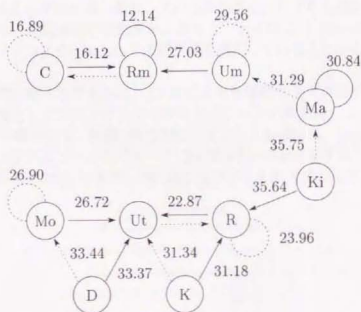


図 5.13: 作品群間の近隣関係 (1)

図 5.13 から、まず C, Rm, Um が一つのグループ C+Rm+Um をなすことがわかる。また、Ma は他のどれとも 30 以上離れており、孤立している。Ki, K, R, Ut, D, Mo は一見一つのグループを形成しているように見えるが、この中ではさらに、R, Ut, Mo が比較的近い関係で結ばれ一つのグループをなす。Ki, K, D は R+Ut+Mo のグループに対しては「最も近い関係」といってもいずれも距離が 30 を越えており、やはり孤立しているといわざるを得ない。

つぎに、近隣関係のグラフの作り方を変え、今度は距離 30 以下のものを無向辺で描くと、図 5.14 を得る。

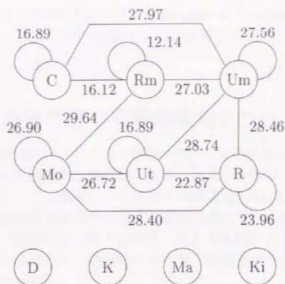


図 5.14: 作品群間の近隣関係 (2)

これから、 $C+Rm+Um$ および $Mo+Ut+R$ が一つのグループを形成し、 Ma, Ki, K, D はいずれも孤立していることがわかる。孤立している作品群は、いずれも色彩表現が豊かな個人的なグループである。作品群間の類似度からみると、とくに C と Rm は極めて近い関係にあるが、両者ともキアロスコーロという表現形態を採用していることからみても妥当な結果である。

最後に、作品群間の類似度をもとに、AV 法による階層的クラスタ分析を行なう。(作品群間の距離を平均距離としたのでクラスタ化法においても AV 法を用いる。) 樹形図を作成してみると、図 5.15 が得られる。距離 30 で切断すると、この図から、 $Um+Rm+C$ が一つのグループ、 $Mo+Ut+R$ がもう一つのグループ、 Ki, D, K, Ma は他のいずれとも距離の遠い作品群であることがわかる。なお、FN 法、NN 法でもクラスタの形成のようすは同様であった。

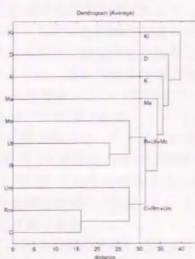


図 5.15: 作品群間の類似度にもとづくクラスタ分析

以上の分析を総合すると、二つのグループ（Caravaggio + Rembrandt + 梅原）、(O.Redon + M.Utrillo + C.Monet)、および四つの孤立した作品群 P.Klee, F.Marc, R.Dufy, 木村が得られることがわかる。

5.5 色分布の類似性に基づく画像検索について

“digital archive”の利用形態の一つとして、画像の内容による検索 (contents-based retrieval) は重要である。本章で扱った色分布の類似性に基づく絵画の分類は、画像検索とは目的を異にするが、当然関連は深い。この問題について若干の考察を行なう。

画像検索については、実用的な観点から盛んに研究が進められており、最近の話題は文献 [74] に詳しい。最近では、画像のもつ様々な特性、たとえば描かれている物の形、色、材質等々を対象とし、それらの抽出手法、類似性の定め方、検索技法など、統合された技術が問題となっている [75, 76, 77 など]。

画像の類似度を、色だけでなく、材質感、形態などの諸要素を同時に考慮して定めるには、それぞれの類似度に重みを乗じた複雑な類似度を構成するのが常である。しかし、このような類似度が人間にとってどのような意味をもつのかは論じられず、ただ検索時の効率のみが評価の対象となっている。(実用上はそれで十分であるという考え方はありうる。)

画像の色彩にのみ問題を絞ってみると、現行では色値を機械依存の色空間で扱っていることが多い。また、色分布をヒストグラムで表わしていることが多い。

機械依存の色空間を用いる場合には、色彩的特徴量として色分布の2次モーメントのみを採用し、照明光の影響を受ける色分布の平均値(1次モーメント)は取り除くことがある。色分布の特徴をモーメントなどの基本統計量で表わす方法は、分布の特徴を保持しかつ情報量を減らす有効な手段である [78 など]。しかし、機械依存の色空間におけるモーメントの意味付けは困難である。モーメント計算には差の計算が含まれるから、差が意味をもつ均等色空間を用いなければならぬ。

色分布間の類似度を定める最も簡単な方法は、類似度をヒストグラム(重みベクトル)間の距離とする方法である。この類似度は5.1節で述べたように、空間を分割するときのサイズ(量子化のパラメタ)に左右され、もとの色空間の距離を反映しない。色分布をヒストグラムで表わし、しかも色空間における距離を類似度に反映させる方法はある。たとえば、著名な検索システムである QBIC [79] では、重みベクトルの2次形式で類似度を表わし、その係数行列をもとの色空間の距離から計算するという方法を用いている。しかしこの場合も、類似度の感覚ないし知覚上の意味付けは困難である。

筆者の与えた(離散)分布間の距離の概念は、もとになる空間の距離がそのまま分布間の距離に反映されるので、この距離を使った類似度の意味は明解である。具体的には、たとえばもとの空間をユークリッド距離が“色差”としての意味をもつ均等色空間(たとえば $L^*u^*v^*$ 色空間)とすれば、その上の色分布間の距離も“色差”としての意味をもつ。この点が既存の概念と筆者のそれとの最も異なる点である。

また、色分布の類似度として、本論文の距離を用いる場合には、色分布の代表値(たとえばモーメント)間の距離を用いる場合に比べ、色分布のもつより多くの情報が生かされるはずである。しかも、ヒストグラムを用いる場合に比べ、高速な計算が可能である。

5.6 まとめ

色分布に限らず、一般の有限離散分布間の距離を定義することができた。この距離の計算は、コスト最小化の輸送問題の解法が流用できるので高速であり、幅広い分野への応用が可能となろう。

また、この距離を用いて、絵画作品の階層的クラスタ分析および作品群間の類似度分析を行なった。その結果、色分布の分類や特徴づけが可能となることがわかった。

今後は、多くの画像に対し色分布間の距離のデータを集積し、この距離によって分類される概念の主要項を、たとえば数量化理論 IV 類や主座標分析など多変量解析 [80] の手法を用いて抽出することにより、より客観的な上位概念を得ることが課題となろう。

6 色空間における配色構造の分析

画家は、色づかいによって‘明暗画家 (luminist)’か‘色彩画家 (colorist)’かのように分類されることがある。たとえば、Caravaggio は明暗画家の、R.Dufy は色彩画家の典型である。この分類は、作品が主に明暗のコントラストを用いて描かれているか、あるいは色みのコントラストを用いて描かれているか、によるのであろう。そうであれば、このような色使いは、色分布の色空間における広がり具合やその方向によって説明できるに違いない。

この章では、色分布を代表する統計量と配色構造との関連を調べ、配色構造を説明するいくつかの变量を示す。そして、この変量により多くの絵画作品の中から、典型的な配色構造をもつ作品を選別する。また、10人の画家の作品群ごとにその配色構造における特徴を述べる。

6.1 色分布と配色楕円体

画像が $N (\geq 1)$ 種の構成色 $c_k \in \mathbb{R}^3$ ($k = 1, 2, \dots, N$) で構成されているものとし、各構成色 c_k の重み (画面に占める面積の比率) を w_k とする ($w_k > 0, \sum_{k=1}^N w_k = 1$)。このとき、色と重みの組 (c_k, w_k) の集合

$$G = \{(c_k, w_k) \mid k = 1, \dots, N\}$$

が、この画像の色分布を表わす。

色分布を代表する単純な統計量として、平均

$$\bar{c} = \sum_{k=1}^N w_k c_k$$

および分散共分散

$$s^{ij} = \sum_{k=1}^N w_k (c_k^i - \bar{c}^i)(c_k^j - \bar{c}^j) \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

に着目する。ここに、記法 c^i は色 c の第 i 成分 ($i = 1, 2, 3$) を表わす。すなわち、 $c = (c^1, c^2, c^3)$ 。

分散共分散行列

$$S = \begin{bmatrix} s^{11} & s^{12} & s^{13} \\ s^{21} & s^{22} & s^{23} \\ s^{31} & s^{32} & s^{33} \end{bmatrix}$$

の固有値を $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$)。対応する固有ベクトルを u_1, u_2, u_3 ($\|u_i\| = 1$ 、

$i = 1, 2, 3$) とする。ベクトル u_1, u_2, u_3 が、それぞれ色分布の第一成分、第二成分、第三成分の方向を表わし、 $\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \sqrt{\lambda_3}$ が各成分の標準偏差である。

色分布を代表するこれらの量は、次に示す中心、長軸、中軸、短軸をもつ「偏差楕円体」により可視化することができる。

中心: $\bar{c} = (\bar{c}^1, \bar{c}^2, \bar{c}^3)$,

長軸: 方向 = u_1 ,
半径 = $\sqrt{\lambda_1}$,

中軸: 方向 = u_2 ,
半径 = $\sqrt{\lambda_2}$,

短軸: 方向 = u_3 ,
半径 = $\sqrt{\lambda_3}$.

偏差楕円体は色分布の大きさや形をおおむね表わす。したがって、偏差楕円体の大小はコントラストの大小を、偏差楕円体の向きや形は配色構造を表わすであろう。その意味で以降この偏差楕円体を、「配色構造楕円体」あるいは単に「配色楕円体」と呼ぶことにする。

図 6.1 に、R. Dufy の絵画 D12 の代表色画像の色分布と配色楕円体を、 $L^*u^*v^*$ 色空間に示す。

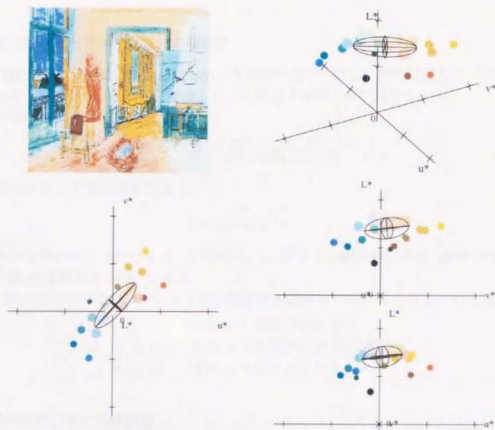


図 6.1: 絵画 D12 の代表色分布と配色楕円体

この絵の配色構造は、おおまかにいえば黄系と青系の補色配色である。このことは、配色楕円体の方向、向き、形から、よく説明がつく。しかし、細かく見ると、この配色は、赤みの黄と青、黄みの赤と緑みの青という二つの微妙に差のある補色配色が組み合わせられた配色であることがわかる。配色楕円体は、おおまかな配色構造を表わすものの、このような細かい配色構造を語るには十分でないことにも注意したい。

i) 配色楕円体の中心位置と絵全体の色彩的印象

代表色分布に対する配色楕円体の中心座標 \bar{e} は、簡単な計算によりもとの色分布の平均と一致することがわかる。平均色 \bar{e} は、絵全体を遠くから目を細めて眺めたときの色、すなわち絵全体の色彩的印象を与える。

ii) 配色楕円体の大きさとコントラストの大小

配色楕円体の長径 $\sqrt{\lambda_1}$ は、色分布の広がり的大小を代表する量である。したがって、この量は、絵の構成色中でもっとも大きい色差を代表する。すなわち、 $\sqrt{\lambda_1}$ はコントラストの大小を表わす。

iii) 配色楕円体の形とコントラストの複雑さ

配色楕円体の形は、細長いか、平たいか、丸いかに分けられる。それに応じて、コントラストも1次元(単純)か、2次元(中庸)か、3次元(複雑)かに分けられる。

配色楕円体の形は、その長径と中径の比

$$\rho_1 = \sqrt{\lambda_2} / \sqrt{\lambda_1}$$

で細長いか否かを、中径と短径の比

$$\rho_2 = \sqrt{\lambda_3} / \sqrt{\lambda_2}$$

で平らか否かを表わすことができる。すなわち、 ρ_1 が小さい配色楕円体は‘棒状’であるし、 ρ_2 が小さい配色楕円体は‘板状’である。

ρ_1, ρ_2 と配色楕円体の形とコントラストの複雑さの関係はつぎのようにまとめられる：

- ρ_1 小： 棒状 ~ 1次元コントラスト、
- ρ_1 大, ρ_2 小： 板状 ~ 2次元コントラスト、
- ρ_1 大, ρ_2 大： 球状 ~ 3次元コントラスト、

iv) 配色楕円体の向きと配色構造

棒状の配色楕円体では、長軸 u_1 は(1次元)コントラストの方向を表わす。 u_1 が明度軸 ($L^*u^*v^*$ 色空間であれば L^* 軸) に対してなす角度を θ_L とすれば(図 6.2)、 θ_L が小さい絵は明暗よりの、 θ_L の大きい絵は色みよりのコントラストをもつ。このことから、明暗変化が大きく色み変化が小さい単色配色は、 θ_L の小さい棒状配色楕円体で、明度変化が小さく色み

変化の大きい単色配色や補色配色は、 θ_L の大きい棒状配色楕円体で表わされることになる。
色空間の第1軸が明度軸を表わすものとすれば、 θ_L は

$$\theta_L = \cos^{-1} u_1^1$$

によって計算できる。

板状の配色楕円体では、短軸 u_3 は‘板’の法線ベクトルにあたり、板の向きを表わす。 u_3 が色み面 ($L^*u^*v^*$ 色空間であれば u^*v^* 面) に対してなす角度を θ_C とすれば (図 6.3)、 θ_C が小さいほど色分布が立っている (ついでたて状)、すなわち明暗変化が大きいことを表わし、 θ_C が大きいほど寝ている (盆状)、すなわち色み変化が大きいことを表わす。このことから、明度変化、色み変化ともに大きい単色配色や補色配色は、 θ_C の小さい棒状配色楕円体で、明度変化が小さい類似配色やトライアード、テトラードなどの多彩な配色は、 θ_C の大きい板状配色楕円体で表わされる。

色空間の第1軸に直交する面が色み面を表わすものとすれば、 θ_C は

$$\theta_C = \sin^{-1} u_3^1$$

によって計算できる。

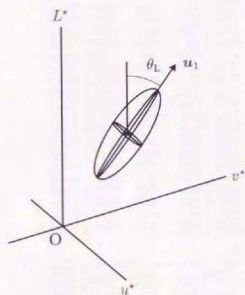


図 6.2: θ_L の意味

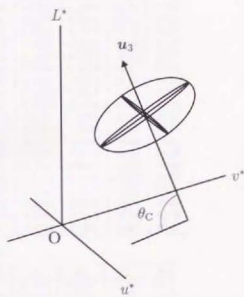


図 6.3: θ_C の意味

明度変化、色み変化ともに大きい多彩配色など複雑な構造をもつ配色は球状の配色楕円体で表わされることになる。

10人の画家、Caravaggio, Rembrandt, O.Redon, C.Monet, R.Dufy, P.Klee, F.Marc, M.Utrillo, 梅原および木村の作品群、全183作品の各代表色分布に対し、 $L^*u^*v^*$ 色空間における \bar{v} , $\sqrt{\lambda_1}$, $\sqrt{\lambda_2}$, $\sqrt{\lambda_3}$, ρ_1 , ρ_2 , θ_L , θ_C の値を、表6.1に示す。

表 6.1: 絵画作品の配色構円体に関するデータ

(a) Caravaggio

作品	\bar{c}	$\sqrt{\lambda_1}$	$\sqrt{\lambda_2}$	$\sqrt{\lambda_3}$	ρ_1	ρ_2	θ_1	θ_0		
C01	38.97	12.85	4.83	22.82	13.18	4.73	0.5775	0.3591	26.24	16.78
C02	32.54	11.21	3.31	22.47	6.53	2.66	0.2908	0.4068	45.75	33.74
C03	38.30	16.44	9.36	26.69	13.50	6.61	0.5057	0.4896	34.55	22.53
C04	29.99	14.23	3.89	20.47	9.37	4.22	0.4577	0.4505	44.91	23.65
C05	30.67	11.78	4.68	24.31	5.64	2.95	0.2318	0.5210	51.92	45.86
C06	34.91	10.86	6.37	21.09	6.27	2.66	0.2971	0.4242	36.42	17.92
C07	33.06	12.05	3.38	19.84	10.51	3.49	0.5295	0.3318	38.36	12.84
C08	71.23	16.99	26.22	26.31	9.32	4.94	0.3543	0.5301	35.07	26.42
C09	38.48	17.55	5.18	25.12	15.15	5.73	0.6032	0.3412	42.11	27.91
C10	43.51	9.35	8.01	26.08	9.21	3.08	0.3533	0.3358	54.18	14.53
C11	47.95	10.69	9.49	23.63	13.55	5.17	0.5732	0.3820	41.96	20.43
C12	47.02	16.97	14.37	27.33	11.21	3.72	0.4102	0.3320	32.45	15.42
C13	26.43	9.42	3.94	20.41	9.98	3.77	0.4889	0.3777	44.35	17.20
C14	34.19	14.49	10.31	28.45	8.63	4.36	0.3032	0.5051	45.01	26.63
C15	31.33	12.77	6.86	26.59	9.56	3.62	0.3594	0.3784	43.73	31.46
C16	31.71	11.80	5.97	24.76	11.87	4.68	0.4793	0.3940	37.91	17.02
C17	29.94	18.23	2.64	26.07	9.24	2.80	0.3546	0.3031	58.91	40.82
C18	29.63	16.10	2.45	22.92	13.51	4.22	0.5893	0.3121	54.94	36.93
C19	28.09	4.95	0.72	17.47	4.66	1.46	0.2670	0.3140	42.90	5.13

(b) Rembrandt

作品	\bar{c}	$\sqrt{\lambda_1}$	$\sqrt{\lambda_2}$	$\sqrt{\lambda_3}$	ρ_1	ρ_2	θ_1	θ_0		
Rm01	40.40	17.14	11.18	26.22	7.49	3.87	0.2858	0.5170	48.07	36.05
Rm02	42.86	21.15	13.73	22.08	12.92	5.02	0.5850	0.3889	45.85	33.60
Rm03	38.25	17.69	13.49	26.07	6.30	3.22	0.2417	0.1934	52.14	51.91
Rm04	34.23	7.63	1.33	19.79	6.74	3.48	0.3405	0.5172	46.39	16.01
Rm05	37.35	14.55	4.10	19.75	5.86	3.22	0.2964	0.5494	43.76	37.51
Rm06	38.02	9.81	6.54	21.14	4.19	2.12	0.1983	0.5062	48.62	48.53
Rm07	34.45	10.98	7.23	23.42	3.96	1.69	0.1690	0.4275	51.61	51.61
Rm08	37.12	9.92	2.37	21.05	5.55	3.77	0.2637	0.6794	50.67	34.31
Rm09	30.15	11.75	0.61	16.70	9.11	2.61	0.5453	0.2867	50.85	46.35
Rm10	31.39	10.58	4.52	14.02	6.97	2.41	0.4970	0.3459	50.22	42.62
Rm11	33.97	9.70	2.39	10.14	3.78	2.89	0.3724	0.7656	47.18	45.24
Rm12	30.85	5.72	6.76	17.15	3.55	2.73	0.2069	0.7707	48.26	36.44
Rm13	33.78	11.92	1.24	16.57	6.08	2.81	0.3671	0.4620	54.85	49.52
Rm14	29.37	8.15	2.23	14.28	5.61	1.78	0.3931	0.3174	59.15	56.88
Rm15	37.66	10.64	8.65	21.28	5.57	3.62	0.2618	0.6491	33.08	23.49
Rm16	41.38	14.15	10.05	18.26	4.57	1.69	0.2502	0.3704	53.02	49.54
Rm17	37.07	15.11	4.01	17.03	10.70	4.94	0.6282	0.3775	46.55	17.60
Rm18	32.03	13.47	5.33	20.92	7.25	2.38	0.3465	0.3284	58.31	46.48
Rm19	26.32	4.40	2.45	17.77	5.73	1.66	0.3225	0.2905	58.08	56.68
Rm20	35.52	14.22	9.44	20.46	4.88	2.12	0.2387	0.4343	49.82	48.90

(c) O.Redon

作品	\bar{c}	$\sqrt{\lambda_1}$	$\sqrt{\lambda_2}$	$\sqrt{\lambda_3}$	ρ_1	ρ_2	θ_1	θ_0		
R01	74.24	30.84	36.64	20.83	14.85	3.71	0.7128	0.2501	50.73	50.71
R02	59.26	22.43	19.58	20.82	9.29	2.16	0.4463	0.3329	55.95	48.50
R03	63.78	0.15	-0.93	28.59	8.93	6.08	0.3081	0.6812	72.47	40.10
R04	70.68	6.61	10.35	23.74	9.62	2.47	0.4052	0.2565	69.33	25.30
R05	55.37	13.42	12.01	17.28	8.85	3.34	0.5122	0.3778	59.56	34.99
R06	48.57	15.02	6.26	14.32	10.46	3.52	0.7204	0.3367	43.87	35.82
R07	45.17	19.12	12.74	21.41	9.25	4.75	0.4318	0.5133	60.18	46.08
R08	72.01	13.82	15.57	16.14	12.75	5.48	0.7902	0.4297	47.58	20.92
R09	64.49	15.20	8.27	18.45	6.88	3.10	0.3726	0.4502	69.51	35.87
R10	49.56	0.88	-4.17	34.90	10.11	5.77	0.2895	0.5707	74.77	10.15
R11	64.87	24.49	21.08	18.80	10.62	4.28	0.5650	0.4028	34.14	33.87
R12	51.40	7.41	6.60	24.63	8.57	5.14	0.3479	0.6002	50.40	2.61
R13	54.78	4.28	9.43	15.02	12.48	6.48	0.8306	0.5189	69.37	52.29
R14	44.59	22.82	12.87	20.12	10.94	2.22	0.5440	0.2026	83.02	49.08
R15	53.72	2.03	0.09	26.03	9.74	4.25	0.3743	0.4358	65.03	3.12
R16	60.81	12.87	7.72	21.57	10.09	3.59	0.4680	0.3556	61.50	26.37
R17	58.39	9.04	8.10	20.48	9.45	3.43	0.4614	0.3629	38.41	26.70
R18	64.57	0.26	11.18	25.26	9.51	4.95	0.3763	0.5207	71.79	3.17
R19	66.18	5.95	13.41	22.30	10.67	3.32	0.4785	0.3116	87.24	54.03

表 6.1: 絵画作品の配色構円体に関するデータ (つづき)

(d) C.Monet

作品	\bar{c}			$\sqrt{\lambda_1}$	$\sqrt{\lambda_2}$	$\sqrt{\lambda_3}$	ρ_1	ρ_2	θ_1	θ_c
Mo01	34.30	-7.40	-15.10	14.31	11.30	4.72	0.7896	0.4179	72.56	2.35
Mo02	61.37	10.88	4.98	12.76	5.97	3.00	0.4677	0.5028	43.45	23.33
Mo03	58.22	6.74	3.18	13.61	5.45	3.64	0.4002	0.6687	82.21	12.03
Mo04	66.02	10.28	14.45	16.07	2.09	0.51	0.1303	0.2443	45.81	11.09
Mo05	56.90	-0.12	1.23	17.33	9.58	4.28	0.5529	0.4468	21.31	5.86
Mo06	38.94	4.88	-6.59	17.17	7.82	2.77	0.4557	0.3538	33.60	4.78
Mo07	65.08	12.47	7.62	11.11	7.10	2.97	0.6389	0.4182	55.01	27.83
Mo08	52.40	5.67	7.40	20.71	11.67	3.89	0.5637	0.3336	45.06	1.65
Mo09	50.15	-0.50	-4.41	13.53	9.60	6.29	0.7097	0.6555	53.15	8.21
Mo10	56.84	-5.74	-19.28	13.78	10.93	4.44	0.7932	0.4059	44.17	23.15
Mo11	49.41	-6.75	-12.28	22.92	9.32	4.69	0.4067	0.5030	83.83	10.79
Mo12	51.62	4.36	-10.59	21.15	8.95	2.73	0.4233	0.3051	42.61	3.03
Mo13	41.73	17.27	12.75	17.90	10.34	3.02	0.5780	0.2922	61.85	49.56
Mo14	51.35	21.13	12.96	22.57	13.65	4.35	0.6047	0.3186	60.35	51.53
Mo15	51.89	-2.86	-6.77	18.28	11.99	7.95	0.6560	0.6627	74.13	1.93
Mo16	67.20	15.50	12.76	17.33	7.44	3.03	0.4291	0.4068	76.35	18.26
Mo17	57.61	-9.38	-19.13	15.67	5.39	2.83	0.3338	0.5259	87.12	7.81
Mo18	45.33	9.27	6.93	25.74	8.43	4.70	0.3274	0.5573	55.78	21.49
Mo19	41.81	5.77	9.51	12.98	6.00	3.81	0.4624	0.6347	57.67	43.77
Mo20	67.38	9.35	5.56	18.46	8.97	2.52	0.4859	0.2810	24.22	10.37
Mo21	33.36	-6.84	-28.80	13.92	4.68	3.92	0.3364	0.8366	67.87	16.19
Mo22	52.28	10.28	6.86	17.96	8.94	6.58	0.4977	0.7358	70.05	11.92
Mo23	38.87	-7.10	-16.85	17.01	6.27	4.75	0.3687	0.7569	80.67	42.57
Mo24	75.04	13.81	19.97	11.21	5.11	1.82	0.4562	0.3555	55.43	12.22

(e) R.Dufy

作品	\bar{c}			$\sqrt{\lambda_1}$	$\sqrt{\lambda_2}$	$\sqrt{\lambda_3}$	ρ_1	ρ_2	θ_1	θ_c
D01	38.90	18.82	16.11	20.20	7.22	3.31	0.3573	0.4590	57.89	57.72
D02	54.95	8.35	4.72	21.04	12.79	5.09	0.6077	0.3978	54.25	22.36
D03	44.66	15.32	19.86	27.46	17.47	5.77	0.6363	0.3305	63.39	54.89
D04	49.16	6.60	2.19	30.92	21.01	9.56	0.6795	0.4549	75.57	21.84
D05	54.74	0.48	3.67	25.86	19.37	15.69	0.7492	0.8100	86.60	23.13
D06	56.25	12.48	8.59	23.31	15.65	10.61	0.6713	0.6779	73.07	12.04
D07	47.99	-16.50	-8.41	27.34	18.91	10.80	0.6915	0.5715	86.33	12.09
D08	30.70	-8.48	-4.62	19.91	14.81	10.38	0.7436	0.7011	25.17	21.71
D09	50.74	17.75	-31.45	31.63	13.92	7.17	0.4400	0.5149	88.27	5.60
D10	56.07	35.75	-6.55	21.57	13.53	10.49	0.6275	0.7749	88.48	56.14
D11	56.73	3.80	-0.01	32.53	16.16	8.04	0.4969	0.4976	81.08	35.15
D12	70.55	2.68	6.55	30.67	10.90	9.23	0.3553	0.8471	84.74	2.42
D13	26.82	4.83	-1.72	15.59	10.55	5.73	0.6768	0.5432	70.08	11.65
D14	48.40	-11.65	-24.46	25.50	10.86	5.15	0.4261	0.4741	73.83	20.91
D15	52.99	-24.11	-35.00	18.92	11.29	4.16	0.5967	0.3683	85.78	7.15
D16	63.05	-16.56	-18.15	20.30	9.47	6.04	0.4666	0.6376	69.75	8.07
D17	75.50	2.88	9.21	29.18	12.94	4.68	0.4434	0.3616	77.53	1.58

(f) P.Klee

作品	\bar{c}			$\sqrt{\lambda_1}$	$\sqrt{\lambda_2}$	$\sqrt{\lambda_3}$	ρ_1	ρ_2	θ_1	θ_c
K01	82.83	12.28	14.45	18.61	9.86	4.66	0.5299	0.4722	67.01	18.58
K02	65.22	24.22	27.34	19.85	11.76	4.04	0.5923	0.3437	58.92	35.25
K03	67.43	-4.91	13.77	16.00	14.38	11.57	0.8992	0.8044	52.06	19.82
K04	38.37	23.71	10.69	31.38	17.32	6.28	0.5519	0.3626	57.04	24.56
K05	47.65	17.82	22.66	32.92	9.07	5.06	0.2735	0.5584	46.96	34.81
K06	71.22	31.37	28.98	14.17	11.26	4.45	0.7945	0.4366	64.45	34.36
K07	66.71	31.94	35.41	22.94	12.40	8.49	0.5626	0.6842	63.31	49.92
K08	35.95	13.84	-2.06	26.72	10.89	6.72	0.4077	0.6174	51.92	18.58
K09	43.50	37.94	12.83	17.65	9.58	2.78	0.5483	0.2874	60.55	42.95
K10	75.92	27.76	18.97	23.82	19.47	6.06	0.8174	0.3114	89.83	58.12
K11	84.21	12.93	16.48	6.52	1.70	1.10	0.2602	0.6474	77.62	5.97
K12	71.52	19.02	19.16	27.38	9.86	5.49	0.3603	0.5567	89.72	46.82
K13	70.19	38.42	30.42	21.60	16.66	4.20	0.7713	0.2520	76.11	60.10
K14	45.65	17.21	11.08	29.83	19.26	11.24	0.6459	0.5836	68.93	22.73
K15	52.90	36.28	10.89	26.08	13.96	5.40	0.3354	0.3867	80.94	44.75
K16	46.81	18.93	1.80	34.20	10.16	9.42	0.2971	0.9275	82.46	19.43
K17	58.81	35.92	21.78	20.95	16.90	9.25	0.8065	0.5473	69.95	33.25
K18	64.11	43.69	24.79	27.67	16.80	9.85	0.6072	0.5862	82.41	28.43
K19	64.25	12.64	9.82	18.21	6.07	1.51	0.3333	0.2481	9.22	6.04
K20	65.99	35.51	26.99	12.13	7.80	3.39	0.6127	0.4349	65.29	40.34

表 6.1: 絵画作品の配色構円体に関するデータ (つづき)

(f) P.Klee (つづき)

作品	\bar{c}	$\sqrt{\lambda_1}$	$\sqrt{\lambda_2}$	$\sqrt{\lambda_3}$	ρ_1	ρ_2	θ_L	θ_C		
K21	56.54	13.58	21.43	16.70	10.06	5.39	0.6023	0.5362	85.53	28.82
K22	58.48	28.70	25.65	21.42	16.58	3.78	0.7742	0.2277	64.62	29.57
K23	75.86	11.05	10.87	18.06	11.29	3.78	0.6252	0.3346	82.09	60.81
K24	59.29	23.70	9.40	25.01	20.10	3.12	0.8038	0.1553	57.01	7.17
K25	67.42	30.82	5.52	19.81	8.71	4.11	0.4399	0.4719	69.57	13.07
K26	57.50	46.03	27.17	19.02	11.79	3.51	0.6196	0.2981	56.35	50.04
K27	72.86	21.20	32.79	15.70	9.31	3.40	0.5927	0.3652	35.28	26.38
K28	67.23	11.86	3.57	13.66	8.81	2.34	0.6451	0.2658	31.98	12.81
K29	70.16	-2.50	-6.84	15.09	10.44	4.70	0.6919	0.4500	75.95	14.24
K30	52.66	44.54	22.89	23.51	11.57	2.14	0.4920	0.1851	63.56	60.46

(g) F.Marc

作品	\bar{c}	$\sqrt{\lambda_1}$	$\sqrt{\lambda_2}$	$\sqrt{\lambda_3}$	ρ_1	ρ_2	θ_L	θ_C		
Ma01	62.17	26.47	40.59	35.30	20.26	6.88	0.5738	0.3394	67.35	60.04
Ma02	49.71	28.59	23.88	39.12	19.14	9.28	0.4892	0.4850	67.72	60.20
Ma03	46.71	11.87	7.84	33.61	14.25	9.15	0.4239	0.6423	86.01	34.12
Ma04	43.04	7.09	6.32	29.18	16.52	9.61	0.5662	0.5815	66.23	43.83
Ma05	45.92	-1.80	-0.63	38.46	23.23	15.81	0.6039	0.6806	83.81	74.06
Ma06	54.52	8.54	-2.12	32.39	19.22	9.11	0.5933	0.4738	80.85	30.07
Ma07	45.50	16.00	3.61	34.55	16.80	7.52	0.4863	0.4475	80.45	62.11
Ma08	43.48	30.32	9.05	40.93	17.52	9.68	0.4279	0.5528	76.05	58.05

(h) M.Utrillo

作品	\bar{c}	$\sqrt{\lambda_1}$	$\sqrt{\lambda_2}$	$\sqrt{\lambda_3}$	ρ_1	ρ_2	θ_L	θ_C		
Uf01	62.39	11.79	11.31	16.84	13.30	6.18	0.9085	0.4038	9.29	8.50
Uf02	63.82	12.97	11.58	20.62	12.50	6.21	0.6060	0.4972	15.76	13.48
Uf03	61.14	10.50	12.57	16.18	6.38	2.55	0.3942	0.3992	20.63	18.33
Uf04	60.66	10.35	11.20	14.93	12.95	4.07	0.8675	0.3139	73.20	3.38
Uf05	54.60	7.68	9.32	15.65	8.22	3.04	0.5257	0.3697	25.01	14.11
Uf06	62.74	-2.47	5.92	19.01	10.48	2.98	0.5512	0.2841	65.02	6.87
Uf07	60.21	2.08	8.99	22.19	14.40	4.72	0.6490	0.3277	27.54	1.87
Uf08	64.17	9.67	17.56	19.30	10.43	4.92	0.5404	0.4717	26.04	0.73
Uf09	65.07	1.84	11.89	17.89	15.53	5.75	0.8680	0.3700	48.29	13.17
Uf10	63.17	0.94	0.82	24.55	14.46	3.38	0.5891	0.2334	55.18	10.90
Uf11	59.17	6.82	6.33	22.64	17.10	4.47	0.7551	0.2613	78.42	4.49
Uf12	71.73	-1.30	8.58	19.57	9.74	4.36	0.4974	0.4477	86.72	0.45
Uf13	61.06	0.71	3.30	15.81	13.20	6.20	0.8346	0.4696	12.16	1.34
Uf14	52.63	2.48	2.86	13.76	8.86	1.86	0.6435	0.2102	1.85	0.74
Uf15	65.18	5.31	11.80	22.16	17.13	8.18	0.7730	0.4777	82.76	3.39
Uf16	68.50	12.02	5.31	19.06	14.67	5.75	0.7701	0.3921	54.03	13.22
Uf17	69.79	14.38	8.26	21.27	12.52	5.66	0.5884	0.4526	75.12	7.78
Uf18	69.48	15.87	13.15	19.16	14.78	6.27	0.7711	0.4244	60.54	17.33
Uf19	69.64	10.18	19.38	15.58	13.60	13.03	0.8730	0.9581	74.68	8.35
Uf20	68.42	9.10	9.25	17.44	12.35	5.79	0.7081	0.4686	18.67	0.51
Uf21	62.35	-1.20	8.22	20.22	17.71	8.84	0.8759	0.1989	38.96	2.18
Uf22	68.58	7.00	0.55	21.79	12.35	7.40	0.5671	0.5986	71.84	2.51
Uf23	70.37	6.88	9.48	22.41	11.40	11.39	0.5086	0.9991	74.65	6.75

(i) 梅原

作品	\bar{c}	$\sqrt{\lambda_1}$	$\sqrt{\lambda_2}$	$\sqrt{\lambda_3}$	ρ_1	ρ_2	θ_L	θ_C		
Um01	38.91	12.14	9.83	20.00	9.42	2.99	0.4713	0.3172	69.66	42.75
Um02	62.42	17.15	6.76	23.29	13.36	6.19	0.5737	0.4635	74.20	13.86
Um03	43.48	5.02	0.48	16.90	15.01	5.20	0.8884	0.3467	6.35	4.09
Um04	61.39	6.50	7.78	20.45	16.52	8.60	0.8077	0.5204	40.90	5.78
Um05	51.56	5.96	10.24	22.55	15.11	6.40	0.6700	0.4234	42.33	30.47
Um06	64.27	16.32	12.06	25.06	12.54	10.12	0.5003	0.8075	66.38	5.81
Um07	45.70	35.03	22.20	23.12	15.58	3.68	0.6740	0.2362	78.54	46.01
Um08	36.53	13.49	1.71	19.78	10.20	6.15	0.5155	0.6029	82.76	9.68
Um09	58.78	19.73	19.44	23.71	14.35	5.26	0.6050	0.3668	60.37	42.49
Um10	50.33	43.74	22.91	28.01	14.64	4.11	0.5228	0.2807	83.96	45.92
Um11	32.57	1.86	-0.68	20.07	10.91	5.13	0.5434	0.4701	29.27	12.63
Um12	40.56	18.99	15.64	32.31	12.16	3.52	0.3765	0.2892	70.94	46.19

表 6.1: 絵画作品の配色楕円体に関するデータ (つづき)
(j) 木村

作品	\bar{c}			$\sqrt{\lambda_1}$	$\sqrt{\lambda_2}$	$\sqrt{\lambda_3}$	ρ_1	ρ_2	θ_L	θ_C
KJ01	49.70	14.09	-1.50	36.05	19.78	11.61	0.5487	0.5870	80.07	58.61
KJ02	67.72	31.37	27.69	26.89	20.11	2.58	0.7481	0.1281	69.14	69.01
KJ03	64.52	1.26	-6.39	30.30	10.91	6.49	0.3612	0.5934	74.05	53.95
KJ04	58.95	17.51	16.42	26.40	18.18	8.08	0.6886	0.1441	76.37	52.73
KJ05	67.79	17.75	22.08	41.41	16.22	5.88	0.3916	0.3628	81.68	69.02
KJ06	74.51	27.89	50.06	34.10	20.42	3.58	0.5988	0.1753	68.11	63.59
KJ07	52.94	42.67	6.91	38.81	14.90	11.95	0.3840	0.8022	77.09	48.77
KJ08	50.13	16.38	-3.59	50.19	19.07	13.07	0.3800	0.6852	85.55	82.69
KJ09	45.29	21.00	0.59	37.26	18.41	11.94	0.4941	0.6485	80.91	46.13
KJ10	69.16	1.49	-3.05	29.32	11.99	7.94	0.4090	0.6619	72.93	26.17
KJ11	61.21	34.94	8.39	39.97	23.89	10.54	0.5977	0.4111	89.21	66.70

6.2 配色楕円体の中心位置による分析

配色楕円体の中心位置を表わす平均色 \bar{c} は、それが有彩色であれば色彩デザインの分野における主調色 (dominant color) の概念に近い。また無彩色であれば、ダイアード、テトラードなどいくつかの拮抗する色の存在を示す。

図 6.4 および図 6.5 に、それぞれ有彩の平均色をもつ作品 2 点および無彩の平均色をもつ作品 2 点を示す。

図 6.4(a) は、茶色が主調色の作品、Caravaggio の C12 である。図 6.4(b) は、鮮やかな青が主調の作品、R.Dufy の D15 である。まさしく、“Dufy の青” が印象的である。



(a) C12



(b) D15

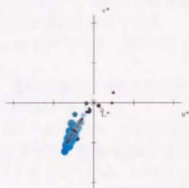


図 6.4: (主調色を表わす) 有彩の平均色をもつ作品 2 例

図 6.5(a) は、O.Redon の R03 である。青と黄の補色配色が灰色の平均色をもたらしている。図 6.5(b) は、F.Marc の Ma05 である。青・黄・赤・緑のテトラードがバランスし、やはり灰色の平均色を与えている。

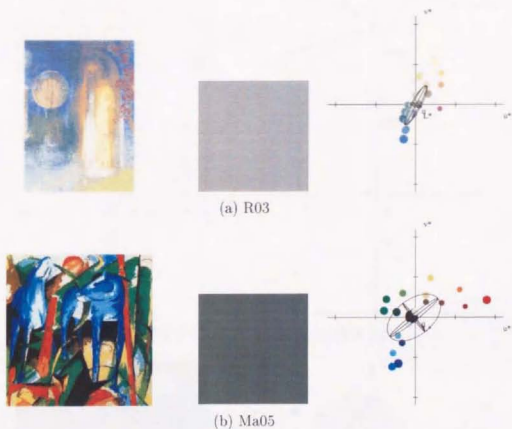


図 6.5: (拮抗する色もたらす) 無彩の平均色をもつ作品 2 例

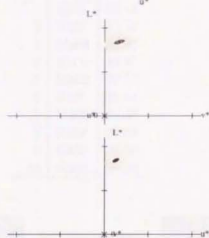
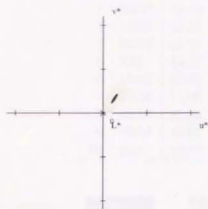
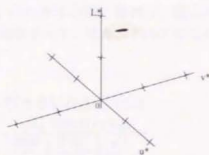
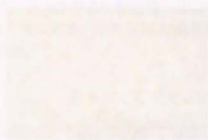
6.3 配色楕円体の大きさによる分析

配色楕円体の大きさは、コントラストの大きさを反映するであろう。表 6.1 の計算結果から、配色楕円体の長径 $\sqrt{\lambda_1}$ が最小となる作品および最大となる作品を選んでみる。

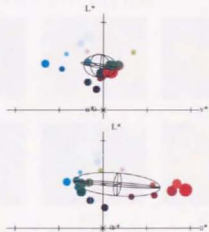
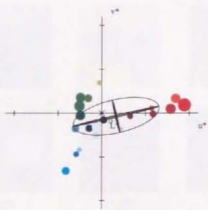
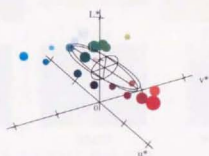
図 6.6 の (a) は、全作品中 $\sqrt{\lambda_1}$ の最も小さな作品、P.Klee の K11 である。図 6.6 の (b) は、全作品中 $\sqrt{\lambda_1}$ の最も大きな作品、木村忠太の Ki08 である。

(a) K11 は、うすい黄を基調とした単色配色の例である。遠目にはただ一色とみえるほど、ごくわずかの彩度変化を使った、コントラストの極めて小さい絵である。

(b) Ki08 は、赤と青緑が画面を大きく左右に二分し、上側に白が乗った、極めてコントラストの大きい絵である。色分布図からわかるように、大きな棒状の配色楕円体が、赤と青緑を結ぶ方向にほぼ水平に横たわっており、色みのコントラストを示している。しかも u^*v^* 面をみると、赤・緑・青のいずれも高彩度の色の重みが大きい。この絵は、無彩の白を除いてみれば、赤・緑・青の三色相が優勢する三色配色のよい例にもなっている。



(a) $\sqrt{\lambda_1}$ 最小 (コントラスト最小) の作品 (K11)



(b) $\sqrt{\lambda_1}$ 最大 (コントラスト最大) の作品 (K108)

図 6.6: $\sqrt{\lambda_1}$ が最小および最大となる作品

表 6.2 に、全 183 作品を配色楕円体の長径 $\sqrt{\lambda_1}$ の大きさの順に整列し、値の小さい方から 10 作品、値の大きい方から 10 作品を選出した結果を示す。また、図 6.7 にこれらの作品の縮小図を示す。

表 6.2: $\sqrt{\lambda_1}$ の小さい作品および大きい作品各 10 点

$\sqrt{\lambda_1}$ の小さい作品			$\sqrt{\lambda_1}$ の大きい作品		
順位	作品	$\sqrt{\lambda_1}$	順位	作品	$\sqrt{\lambda_1}$
1	K11	6.52	1	Ki08	50.19
2	Rm11	10.14	2	Ki05	41.41
3	Mo07	11.11	3	Ma08	40.93
4	Mo24	11.21	4	Ki11	39.97
5	K20	12.13	5	Ma02	39.12
6	Mo02	12.76	6	Ki07	38.81
7	Mo19	12.98	7	Ma05	38.46
8	Mo09	13.53	8	Ki09	37.26
9	Mo03	13.61	9	Ki01	36.05
10	K28	13.66	10	Ma01	35.30



図 6.7: $\sqrt{\lambda_1}$ の小さい作品および大きい作品各 10 点

図 6.7 から、 $\sqrt{\lambda_1}$ の大小が、コントラストの大小とよく対応することが見てとれる。また表 6.2 から、 $\sqrt{\lambda_1}$ の小さい作品には、C.Monet の作品が多く、 $\sqrt{\lambda_1}$ の大きい作品には、木村と F.Marc のものが多いこともわかる。

10 作品群それぞれについて、 $\sqrt{\lambda_1}$ の最大値、最小値、平均値、標準偏差を表 6.3 および図 6.8 に示す。

表 6.3: 作品群ごとの $\sqrt{\lambda_1}$ の最小値、最大値、平均値、標準偏差

画家 \ $\sqrt{\lambda_1}$	最小値	最大値	平均値	標準偏差
C	17.47	28.45	23.83	2.892
Rm	10.14	26.22	19.20	3.857
R	14.32	34.90	21.64	4.845
Mo	11.11	25.74	16.81	3.731
D	15.59	32.53	24.82	4.995
K	6.52	34.20	21.19	6.355
Ma	29.18	40.93	35.44	3.632
Ut	13.76	24.55	19.05	2.850
Um	16.90	32.31	22.94	3.962
Ki	26.40	50.19	35.52	6.803

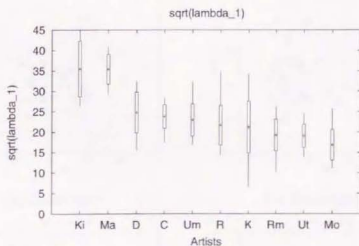


図 6.8: 作品群ごとの $\sqrt{\lambda_1}$

表 6.3 あるいは図 6.8 から、とくに $\sqrt{\lambda_1}$ が大きい (コントラストの大きい) 作品群として木村と F.Marc が、 $\sqrt{\lambda_1}$ がもっとも小さい (コントラストの小さい) 作品群として、C.Monet があげられる。この結果は表 6.2 とよく合う。さらに、標準偏差の大きさに注目すると、P.Klee は標準偏差が大きく、さまざまなコントラストの作品が含まれること、逆に M.Utrillo と Caravaggio は標準偏差が小さく、どの作品のコントラストも似通っていることがわかる。

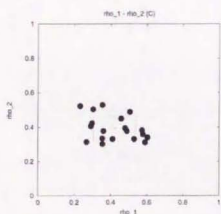
6.4 配色楕円体の形による分析

配色楕円体の形は、コントラストの複雑さを反映するであろう。

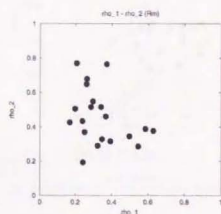
10 作品群それぞれについて、 (ρ_1, ρ_2) の最大値、最小値、平均値、標準偏差を表 6.4 に、また、 (ρ_1, ρ_2) の 2 次元散布図を図 6.9 に示す。図中の×印は平均値を、点線の枠は標準偏差を示している。

表 6.4: 各作品群に対する ρ_1, ρ_2 の最小値、最大値、平均値、標準偏差

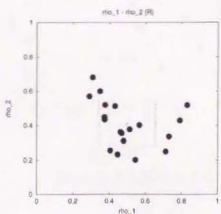
画家 \ ρ_1	最小値	最大値	平均値	標準偏差	画家 \ ρ_2	最小値	最大値	平均値	標準偏差
C	0.2318	0.6032	0.4224	0.1171	C	0.3031	0.5301	0.3942	0.0720
Rm	0.1690	0.6282	0.3405	0.1278	Rm	0.1934	0.7707	0.4589	0.1569
R	0.2895	0.8306	0.4971	0.1571	R	0.2026	0.6812	0.4111	0.1293
Mo	0.1303	0.7932	0.4949	0.1516	Mo	0.2443	0.8366	0.4841	0.1660
D	0.3553	0.7492	0.5686	0.1287	D	0.3305	0.8471	0.5542	0.1572
K	0.2602	0.8992	0.5842	0.1691	K	0.1553	0.9275	0.4444	0.1812
Ma	0.4239	0.6039	0.5206	0.0682	Ma	0.3394	0.6806	0.5254	0.1040
Ut	0.3942	0.9085	0.6811	0.1467	Ut	0.2102	0.9991	0.4491	0.1878
Um	0.3765	0.8884	0.5957	0.1384	Um	0.2362	0.8075	0.4271	0.1545
Ki	0.3612	0.7481	0.5093	0.1297	Ki	0.1281	0.8022	0.5027	0.2043



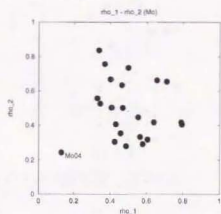
(a) Caravaggio



(b) Rembrandt

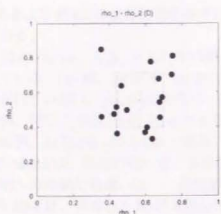


(c) O.Redon

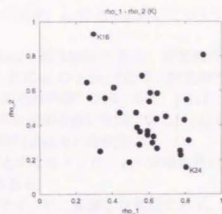


(d) C.Monet

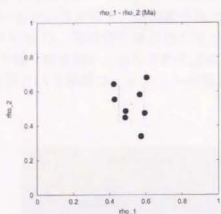
図 6.9: 各作品群に対する ρ_1, ρ_2 の 2 次元散布図



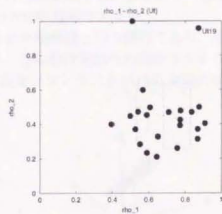
(e) R. Dufy



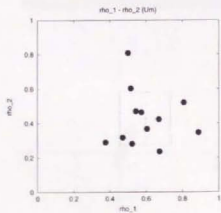
(f) P. Klee



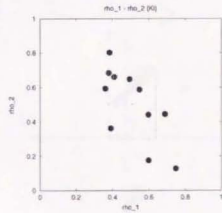
(g) F. Marc



(h) M. Utrillo



(i) 梅原



(j) 木村

図 6.9: 各作品群に対する ρ_1, ρ_2 の 2 次元散布図 (つづき)

図 6.9 および表 6.1 の計算結果を参考に、 ρ_1 の大小、 ρ_2 の大小に応じていくつかの作品を選んでみる。

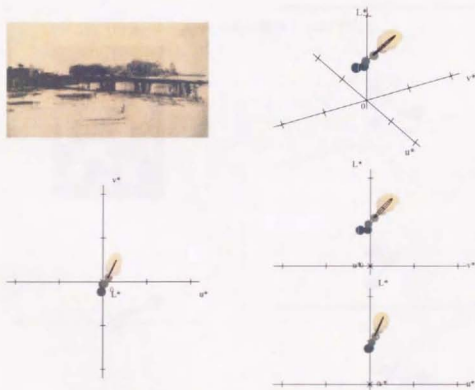
図 6.10 の (a) は、 ρ_1, ρ_2 ともに小の例、C.Monet の Mo04 である。配色楕円体は細長く、つぶれている。(b) は、 ρ_1 が小、 ρ_2 が大の例、P.Klee の K16 である。配色楕円体は細長い、つぶれていない。(a),(b) はともに“棒状の配色楕円体”の例である。(c) は、 ρ_1 が大、 ρ_2 が小の例、同じく P.Klee の K14 である。配色楕円体は薄い板状である。(d) は、 ρ_1, ρ_2 ともに大の例、M.Utrillo の Ut19 である。配色楕円体は丸い球状である。

(a) の Mo04 は、彩度の低い黄・茶系を主調とするモノクローム・明暗配色の典型である。暗から明への単調な色使いは、一見墨絵風でもある。

(b) の K16 は、青色系と黄・赤系の片をモザイク状に配置した構成である。配色構造は、おおまかにみれば、明暗差が小さく色相コントラストの大きい補色配色である。

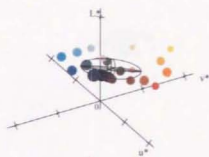
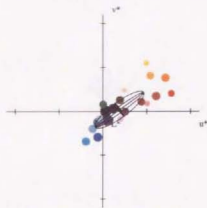
(a),(b) いずれも、一つの方向のコントラストを主な表現手段としており、他の色変化はおさえているという意味で、棒状配色楕円体との対応が理解できよう。

(c) の K24 は、茶の枠に無彩色の白・灰・黒の市松模様という構図であり、当然配色楕円体は無彩軸（明度軸）と茶を含む平面状になる。この絵は無彩色の明暗コントラスト配色に有彩・無彩という彩度コントラストを添えた 2 次元コントラストが色彩表現の手段となっている。

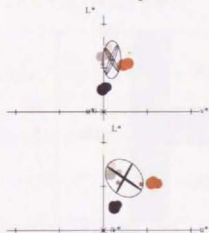
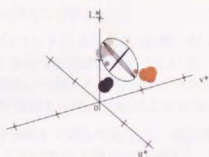
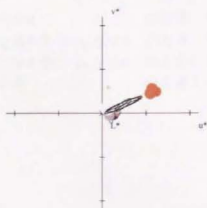


(a) ρ_1 小、 ρ_2 小（つぶれた棒状）の例 (Mo04)

図 6.10: ρ_1, ρ_2 の大小の例

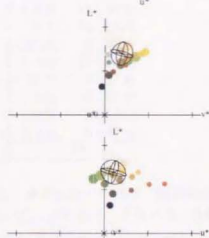
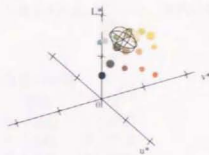
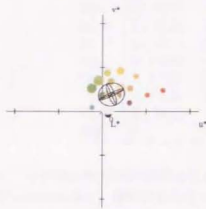


(b) ρ_1 小, ρ_2 大 (丸い棒状) の例 (K16)



(c) ρ_1 大, ρ_2 小 (板状) の例 (K24)

図 6.10: ρ_1, ρ_2 の大小の例 (つづき)



(d) ρ_1 大, ρ_2 大 (球状) の例 (Ut19)

図 6.10: ρ_1, ρ_2 の大小の例 (つづき)

(d) の Ut19 は、緑と赤という美しいが本来は強いコントラストを草・黄・橙のグラデーションで中和し、さらに白と黒のコントラストを添えた複雑な配色構造をもっている。それゆえ、配色楕円体は球状をなすのである。配色楕円体が球状に分類される場合は、それだけで配色構造が分析できるわけではない。むしろ複雑な配色構造を示唆していることになる。

ここで、 ρ_1, ρ_2 の大小で、各作品群の配色構造の傾向を分類してみよう。偏差楕円体の“形”を、以下に示す ρ_1, ρ_2 の範囲によって定めることにする (図 6.11 も参照)。

- | | | |
|--|-----|------|
| $\rho_1 \leq 0.4$ | のとき | ‘棒状’ |
| $\rho_1 \geq 0.6$ かつ $\rho_2 \leq 0.4$ | のとき | ‘板状’ |
| $\rho_1 \geq 0.6$ かつ $\rho_2 \geq 0.6$ | のとき | ‘球状’ |
| その他 | のとき | ‘未定’ |

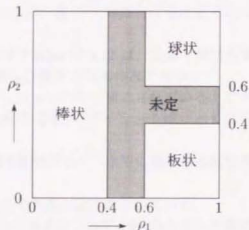


図 6.11: 配色楕円体の形と ρ_1, ρ_2 の範囲

各作品群ごとに、配色楕円体の形を調べてみると表6.5のようになる。表内の数字は該当する作品数、かっこ内は割合(%)である。

表 6.5: 配色楕円体の形の分類

作品群	棒状	板状	球状	未定
C	9 (47.4)	1 (5.3)	0 (0.0)	9 (47.4)
Rm	16 (80.0)	1 (5.0)	0 (0.0)	3 (15.0)
R	6 (31.6)	2 (10.5)	0 (0.0)	11 (57.9)
Mo	5 (20.8)	1 (4.2)	2 (8.3)	16 (66.7)
D	2 (11.8)	2 (11.8)	4 (23.5)	9 (52.9)
K	5 (16.7)	7 (23.3)	1 (3.3)	17 (56.7)
Ma	0 (0.0)	0 (0.0)	1 (12.5)	7 (87.5)
Ut	1 (4.3)	6 (26.1)	1 (4.3)	15 (65.2)
Um	1 (8.3)	3 (25.0)	0 (0.0)	8 (66.7)
Ki	4 (36.4)	1 (9.1)	0 (0.0)	6 (54.5)
合計	49	24	9	101

これから、全作品の配色楕円体の形に着目すると、未定を別とすれば、棒状のものが多く、ついで板状のものが多く、球状のものはかなり少ないことがわかる。すなわち、比較的単純な配色構造をもつ作品が多いといえる。また、各作品群に着目すると、Caravaggio, Rembrandt, O.Redon, C.Monet, および木村の作品は棒状の配色楕円体をもつ傾向があること、P.Klee, M.Utrillo, および梅原の作品は、板状の配色楕円体をもつ傾向があること、R.Dufy は球状の配色楕円体をもつ傾向があることがわかる。

6.5 配色楕円体の向きによる分析

(1) 棒状の配色楕円体

前述したように、棒状の配色楕円体においては、長軸と明度軸との角度 θ_L は、コントラストの方向を表わす。すなわち、 θ_L が小さければ明暗よりの、 θ_L が大きければ色みよりのコントラストを表わす。

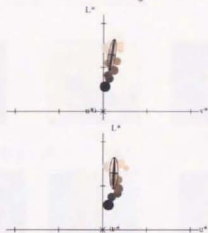
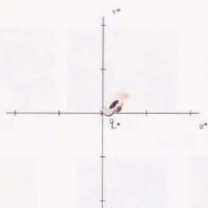
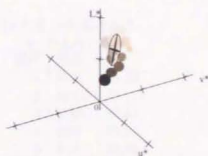
図6.12の(a)に示すP.KleeのK19および(b)に示すP.KleeのK12は、前節で棒状の偏差楕円体をもつと判断された作品の中で、 θ_L が最小および最大となる作品である。

(a)のK19は、モノクロームの典型的な明暗グラデーションのみで構成されている。このような、うすい肌色からこげ茶に到る彩度の低い黄色相の明暗グラデーションは、とくにカマイユ(camaïeu, カメオ風の)配色と呼ばれている。

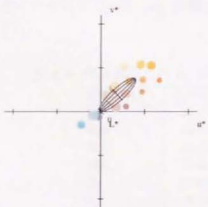
(b)のK12は、ほぼ同一の明度で橙から青に到る補色配色であり、水平に横たわる配色楕円体はまさしくこの配色構造を物語っている。

これらの例は、いずれも θ_L とコントラストの方向との対応のよさを示している。

表6.6に、全183作品のなかで棒状の配色楕円体をもつものについて、 θ_L の大きさの順に整列し、値の小さい方から5作品、値の大きい方から5作品を選出した結果を示す。また、図6.13にこれらの作品の縮小図を示す。



(a) θ_L 最小 (明暗よりのコントラスト) の作品 (K19)



(b) θ_L 最大 (色みよりのコントラスト) の作品 (K12)

図 6.12: 棒状の配色楕円体をもつ作品中で θ_L が最小および最大となる作品

表 6.6: θ_L の小さい作品および大きい作品各 5 点

θ_L の小さい作品			θ_L の大きい作品		
順位	作品	θ_L	順位	作品	θ_L
1	K19	9.22	1	K12	89.72
2	Ut03	20.63	2	Mo17	87.12
3	Rm15	33.08	3	Ki08	85.55
4	C08	35.07	4	D12	84.74
5	C06	36.42	5	K16	82.46



図 6.13: θ_L の小さい作品および大きい作品各 5 点

θ_L の小さい 5 作品は、いずれも黄-赤色相の単色配色であり、明度変化を色彩表現の主としている。ただし C08 だけは、彩度変化が他より大きめである。

θ_L の大きい 5 作品は、いずれも色み変化を色彩表現の主たる手だてとしている。いずれもこれまでに配色構造を解説した作品なので、ここでは解説を省略する。

10 作品群それぞれについて、 θ_L の最小値、最大値、平均値、標準偏差を表 6.7 および図 6.14 に示す。

表 6.7: 作品群ごとの θ_L の最小値、最大値、平均値、標準偏差

画家 \ θ_L (°)	最小値	最大値	平均値	標準偏差
C	35.07	58.91	44.88	6.84
Rm	33.08	59.45	50.21	6.22
R	50.40	74.77	67.33	8.15
Mo	45.84	87.12	67.45	15.26
D	57.89	84.74	71.31	13.43
K	9.22	89.72	61.20	29.80
Ma	0.00	0.00	0.00	0.00
Ut	20.63	20.63	20.63	0.00
Um	70.94	70.94	70.94	0.00
Ki	74.05	85.55	79.59	4.38

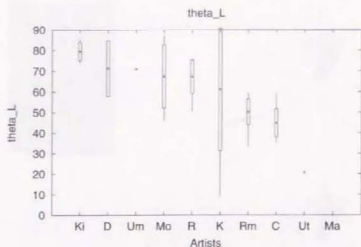


図 6.14: 作品群ごとの θ_L

表 6.7 および図 6.14 から、Caravaggio と M.Utrillo の作品群は明暗よりのコントラストをもち (θ_L が小さく)、木村 と R.Dufy の作品群は色みよりのコントラストをもち (θ_L が大きい) ことがわかる。また、P.Klee を除けばどの作品群も標準偏差が小さく、コントラストの方向が作品に共通する特徴であることがうかがえる。

(2) 板状の配色楕円体

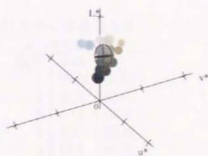
板状の配色楕円体も場合、短軸と色み面とのなす角 θ_C は、'板'の法線の向きを表わす。板状の配色楕円体をもつと判断された作品の中から、 θ_C が最小および最大となる作品を図 6.15 に示す。

(a) の Ut14 は、彩度の低い黄・茶を基調とする街並みに、白みを帯びた青い空と白い教会がかいま見える。色分布は厚みの薄い板状でほぼ垂直に立っている。低彩度の青・黄の補色配色とほどよい明暗コントラストで書かれた絵である。

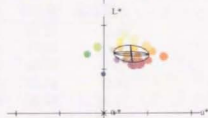
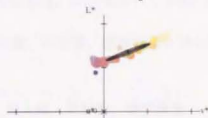
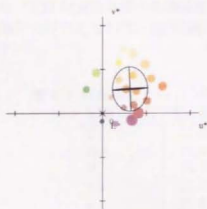
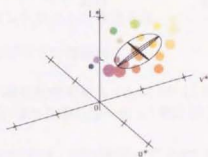
(b) の Ki02 は、少量の青、大量の赤みの紫、赤から橙をへて黄へ、そして草色・緑へと一巡するすべての色相を含む多色配色の好例である。赤みの紫、黄、草色はいずれも彩度が高く重みも大きい。赤みの紫と草色・緑は補色配色と同様の色相コントラストをなし、印象的である。とくに L^*a^* 面図をみると明らかであるが、配色楕円体はみごとな寝た'板'となっている。

これらの例は、板状の配色楕円体の向きと、配色構造との対応をよく表わした例となっている。

表 6.8 に、全 183 作品のなかで板状の配色楕円体をもつものについて、 θ_C の大きさの順に整列し、値の小さい方から 5 作品、値の大きい方から 5 作品を選出した結果を示す。また、図 6.16 にこれらの作品の縮小図を示す。



(a) θ_C 最小 (立った板状) の作品 (Ut14)



(b) θ_C 最大 (寝た板状) の作品 (Ki102)

図 6.15: 板状の配色楕円体をもつ作品中で θ_C が最小および最大となる作品

表 6.8: θ_C の小さい作品および大きい作品各 5 点

θ_C の小さい作品			θ_C の大きい作品		
順位	作品	θ_C	順位	作品	θ_C
1	Ut14	0.74	1	Ki02	69.01
2	Ut07	1.87	2	K23	60.81
3	Ut04	3.38	3	K13	60.10
4	Um03	4.09	4	K10	58.12
5	Ut11	4.49	5	D03	54.89



Ut14



Ut07



Ut04



Um03



Ut11

(a) θ_C の小さい (明暗よりのコントラスト) 作品 5 点



Ki02



K23



K13



K10



D03

(b) θ_C の大きい (色みよりのコントラスト) 作品 5 点

図 6.16: θ_C の小さい作品および大きい作品各 5 点

θ_C の小さい板状の色分布をもつ作品は、すべて補色配色である (θ_C は 15° 以下)。Um03 以外は黄青の補色配色であるが、Um03 だけは深い緑から濃い赤への u^* 軸に添った補色配色となっている。

逆に θ_C の大きい板状の配色楕円体をもつ作品の配色は、K13 を除いて Ki02 と似た多色配色である。(K13 は黄から赤への類似配色。)

10 作品群それぞれについて、 θ_C の最小値、最大値、平均値、標準偏差を表 6.9 および図 6.17 に示す。

表 6.9: 作品群ごとの θ_C の最小値、最大値、平均値、標準偏差

画家 \ $\theta_C(^\circ)$	最小値	最大値	平均値	標準偏差
C	27.91	27.91	27.91	0.00
Rm	17.60	17.60	17.60	0.00
R	35.82	50.72	43.27	7.45
Mo	51.53	51.53	51.53	0.00
D	22.36	54.89	38.63	16.27
K	7.17	60.81	39.80	21.35
Ma	0.00	0.00	0.00	0.00
Ut	0.74	13.22	6.15	5.12
Um	4.09	46.01	30.86	18.98
Ki	69.01	69.01	69.01	0.00

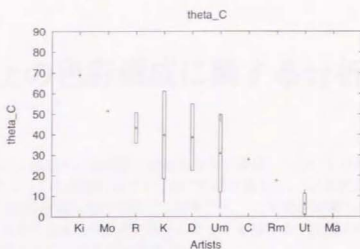


図 6.17: 作品群ごとの θ_C

木村と C.Monet の 2 作品を除いて、あとはおおむね立った板状の分布であることがわかる。とくに M.Utrillo の作品群の色分布はほぼ垂直に近く、標準偏差も低くばらつきが少ない。

6.6 まとめ

この章では、まず、色分布を代表する基本統計量の幾何学的表現として‘配色楕円体’を定義した。つぎに、この配色楕円体を規定する幾何学的諸量にもとづき、10 人の画家の絵画作品を分類したところ、これらの量が作品の配色構造をよく説明することが観察された。具体的には、次の通りである。

- 配色楕円体の中心位置は、絵全体の色彩的印象に対応する。
- 配色楕円体の大きさは、コントラストの大小に対応する。
- 配色楕円体の形は、配置構造の複雑さ（1次元コントラストか、2次元コントラストか、それとも3次元コントラストか）を表わす。
- 配色楕円体の向きは、配色構造のタイプ（明暗型か色み型かなど）を表わす。

さらに、これらの諸量により各画家の作品群を分類したところ、各作品群の配色上の特徴がわかった。

配色楕円体は、色分布の平均値を中心とする 2 次モーメントを可視化したものにあたる。したがって、配色楕円体を規定する幾何学的諸量を、5.5 節でふれた画像検索に使うことができる。しかも、これらの量は本章で述べた配色上の明解な意味をもつので、より人間向きの検索に利用できるであろう。

7 画面上の色彩構成に関する分析

これまでの章では、構成色の色空間における分布に着目した分析を行ってきた。すなわち、“どの色がどれくらいの量使われているか”だけに着目し、“どの色がどのように配置されているか”については考慮しなかった。この章では、“どの色が画面のどこに存在するか”、すなわち構成色の2次元画面上の分布に着目した分析を試みる。画面上の色彩構成の均整度や対称性などに言及することを目標とする。

7.1 色の配置と色彩構成楕円

2次元離散画面 $M \subset Z^2$ をもつ画像 $f: M \rightarrow R^3$ の構成色集合を $B = f(M)$ とするとき、ある範囲 $V \subset B$ ($V \neq \emptyset$) に属する色の画面上の配置状況、すなわちこれらの色の画面上の分布は、それらの色をもつ画素の集合

$$X = f^{-1}(V)$$

で表わせる。(このとき $X \neq \emptyset$)

色の配置の中心を表わす代表値として、 X の重心

$$\bar{x} = \frac{1}{\#X} \sum_{x \in X} x$$

を考える。この \bar{x} を、 X のあるいは V に属する色の‘色配置中心’と呼ぶことにする。 \bar{x} は、一般には R^2 の元となり M ないし Z^2 の元とはならない。以下、画面上の点の座標は、一般に実数値をとるものとする。

色の配置の広がり具合やその方向を表わす代表値として、分布の主成分の方向と標準偏差を考える。画面上の点 x の横座標を x^1 、縦座標を x^2 と書くことにすれば、画素の分布 X の主成分方向および標準偏差は次のように計算される。

まず、分散共分散行列

$$S = \begin{bmatrix} s^{11} & s^{12} \\ s^{21} & s^{22} \end{bmatrix},$$

$$s^{ij} = \frac{1}{\#X} \sum_{x \in X} (x^i - \bar{x}^i)(x^j - \bar{x}^j) \quad (i, j = 1, 2)$$

を計算する。つぎに、 S の固有値 λ_1, λ_2 ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq 0$) および各固有値に対応する固有ベクトル u_1, u_2 を求める。ベクトル u_1 および u_2 が、それぞれ分布 X の主成分および副成分の方向を表わし、 $\sqrt{\lambda_1}$ および $\sqrt{\lambda_2}$ がそれぞれ主成分方向および副成分方向の標準偏差である。

色の配置を表わすこれらの代表値を可視化するために、次に示す中心、長軸、短軸をもつ‘偏差楕円’を考える：

中心: $\bar{x} = (\bar{x}^1, \bar{x}^2)$, (色配置中心)

長軸: 方向 = u_1 ,

半径 = $\sqrt{\lambda_1}$,

短軸: 方向 = u_2 ,

半径 = $\sqrt{\lambda_2}$.

以後、この偏差楕円のことを「色配置楕円」と呼ぶことにする。

図 7.1 に、O.Redon の R15 の $L^*u^*v^*$ 色空間における代表色分布と代表色画像、黄色および青色の配置、およびそれらの色配置楕円を示す。

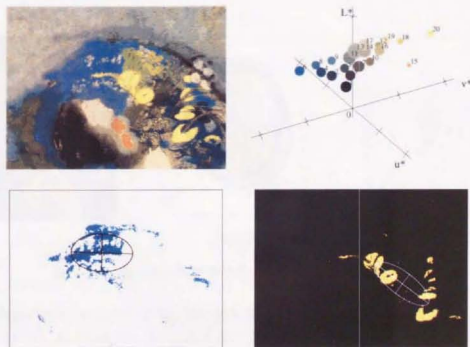


図 7.1: R15 の黄および青の配置と色配置楕円

色配置楕円の中心は色の配置の中心を、大小は色の配置の広がり具合を、そして長径と短径の比は色の配置の方向を表わす。

さて、一つの絵画のすべての構成色の配置状況を、色配置楕円を描くことによって表わしてみよう。これまでと同様に、簡単のため代表色画像の構成色を扱うことにする。

図 7.2(a) は、Caravaggio の C11 の構成色の全色配置楕円と全色配置中心、(b) は、P.Klee の K05 の構成色の全色配置楕円と全色配置中心である。色配置楕円の周縁部の面積は、その色の重みに比例させてある。また色配置中心を表わす円の面積は、やはりその色の重みに比例させてある。

C11 の各構成色は、それぞれ画面上のあちこちに分散して配置されているのに対し、K05 の構成色は、いずれも画面の中央に中心をもち、ほとんど同じような広がり度で配置されることが、色配置楕円や色配置中心の位置や大きさからわかる。

そこで、各構成色の色配置中心の分布のようすを定量的に表わすために、色配置中心の分布に対する新たな偏差楕円を考える。

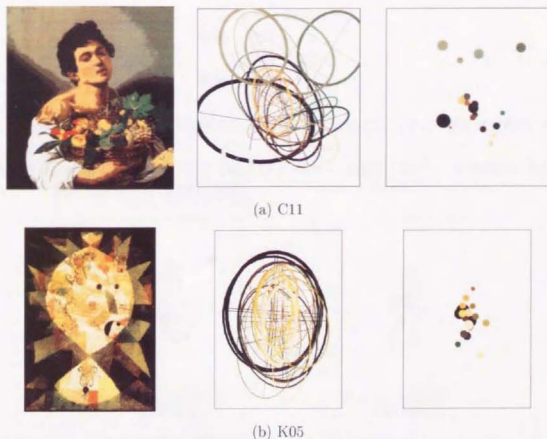


図 7.2: 全構成色の配置を表わす色配置楕円と色配置中心

画像の構成色数を $N (\geq 1)$, 各構成色の色配置中心を \bar{x}_k , 重み (その構成色が画面に占める面積の全面積に対する比率) を w_k とする。このとき, 色配置中心の分布は, \bar{x}_k と w_k の組の集合

$$F = \{(\bar{x}_k, w_k) \mid k = 1, 2, \dots, N\}$$

で表わせる。この分布の重心すなわちすべての色配置中心の重心

$$\bar{x} = \sum_{k=1}^N w_k \bar{x}_k$$

は, 簡単な計算により, \bar{x} は画面の中心に一致することがわかる。色配置中心の分布の広がり具合やその方向を知るために, 分散共分散行列

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} \bar{s}^{11} & \bar{s}^{12} \\ \bar{s}^{21} & \bar{s}^{22} \end{bmatrix},$$

$$\bar{s}^{ij} = \sum_{k=1}^N w_k (\bar{x}_k^i - \bar{x}^i)(\bar{x}_k^j - \bar{x}^j) \quad (i, j = 1, 2)$$

の固有値 $\mu_1, \mu_2 (\mu_1 \geq \mu_2 > 0)$ および各固有値に対応する固有ベクトル $v_1, v_2 (\|v_i\| = 1, i = 1, 2)$ を求める。これらから, 次に示す中心, 長軸, 短軸をもつ新たな偏差楕円を作る:

中心: x (= 画面の中心)
 長軸: 方向 = v_1 ,
 半径 = $\sqrt{\mu_1}$,
 短軸: 方向 = v_2 ,
 半径 = $\sqrt{\mu_2}$.

この偏差楕円は、全構成色の配置状況を代表することから、とくに「色彩構成楕円」と呼ぶことにする。

先に取り上げた Caravaggio の C11 および P.Klee の K05 について、全構成色の色配置中心の分布と色彩構成楕円を図 7.3 に示す。

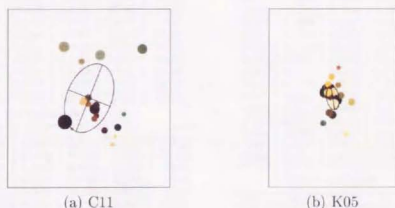


図 7.3: 色配置中心の分布と色彩構成楕円

色彩構成楕円の大きさや向きは、各構成色の配置の偏り具合や対称性など、色彩構成の均整度を表わすであろう。色彩構成楕円の長径 $\sqrt{\mu_1}$ が小さければ、各構成色は画面中央を中心に点対称の配置になっているであろうし、長径 $\sqrt{\mu_1}$ が大きくても短径 $\sqrt{\mu_2}$ が小さければ、構成色は長軸 v_1 を対称軸として線対称の配置をするであろう。そこで、色彩構成の均整度を測る尺度として

$$\alpha = \sqrt{\mu_1 \mu_2}$$

を考えることにする。 α が小さければ、色配置に対称性のある均整のとれた色彩構成であろうし、 α が大きければ、各色配置中心が画面に散在するダイナミックな色彩構成であろう。 α は、色彩構成楕円の面積に比例する量であり、色配置中心の分布の各成分方向の分散の幾何平均でもある。

さらに、色彩構成楕円の形と向きを表わす量として、長径と短径の比

$$\rho = \sqrt{\mu_2} / \sqrt{\mu_1},$$

および長軸と画面の横軸（水平方向）とのなす角

$$\theta = \cos^{-1}(v_1)$$

を考えることにする。 ρ は色配置の対称性を表わし、 θ は対称軸の方向を表わす。

10人の画家、Caravaggio, Rembrandt, O.Redon, C.Monet, R.Dufy, P.Klee, F.Marc, M.Utrillo, 梅原および木村の作品群、計 183 作品について、 $\sqrt{\mu_1}$, $\sqrt{\mu_2}$, α , ρ , および θ を計算した結果を、表 7.1 に示す。

表 7.1: 絵画作品の色彩構成積円に関するデータ

(a) Caravaggio

銘柄	$\sqrt{\mu_1}$	$\sqrt{\mu_2}$	α	ρ	θ
C01	0.1448	0.0838	0.6121	0.5785	165.92
C02	0.1137	0.0888	0.0101	0.7811	18.90
C03	0.1777	0.0981	0.0174	0.5520	133.18
C04	0.1308	0.1178	0.0154	0.9009	12.72
C05	0.1373	0.0944	0.0130	0.6872	44.52
C06	0.1431	0.1227	0.0176	0.8571	113.05
C07	0.1211	0.0502	0.0061	0.4146	95.42
C08	0.1861	0.0563	0.0105	0.3023	91.77
C09	0.1018	0.0873	0.0089	0.8575	86.20
C10	0.1488	0.1193	0.0177	0.8018	55.86
C11	0.2010	0.1271	0.0256	0.6327	68.47
C12	0.1451	0.1076	0.0156	0.7412	57.05
C13	0.1067	0.0713	0.0076	0.6675	107.37
C14	0.0996	0.0666	0.0066	0.6688	100.84
C15	0.1194	0.0443	0.0053	0.3714	87.60
C16	0.0776	0.0669	0.0052	0.8619	132.03
C17	0.1727	0.0532	0.0092	0.3082	100.25
C18	0.1803	0.0527	0.0095	0.2921	80.75
C19	0.1560	0.0476	0.0074	0.3051	125.22

(b) Rembrandt

銘柄	$\sqrt{\mu_1}$	$\sqrt{\mu_2}$	α	ρ	θ
Rm01	0.1668	0.0634	0.0106	0.3800	132.20
Rm02	0.1496	0.0635	0.0095	0.4246	14.99
Rm03	0.0829	0.0538	0.0045	0.6484	59.98
Rm04	0.0915	0.0705	0.0065	0.7702	27.38
Rm05	0.1356	0.0925	0.0125	0.6820	11.89
Rm06	0.1301	0.1039	0.0135	0.7983	175.71
Rm07	0.1483	0.0392	0.0058	0.2642	126.36
Rm08	0.0989	0.0483	0.0048	0.4884	123.96
Rm09	0.1361	0.0628	0.0085	0.4616	133.22
Rm10	0.1133	0.0502	0.0057	0.4428	41.97
Rm11	0.1120	0.0556	0.0062	0.4966	54.73
Rm12	0.2229	0.0770	0.0172	0.3453	85.18
Rm13	0.1184	0.0740	0.0088	0.6252	16.64
Rm14	0.1343	0.0371	0.0050	0.2763	153.07
Rm15	0.1188	0.0541	0.0064	0.4550	50.70
Rm16	0.1357	0.0331	0.0045	0.2441	2.26
Rm17	0.1443	0.0848	0.0122	0.5881	88.53
Rm18	0.1309	0.0689	0.0090	0.5265	105.76
Rm19	0.0823	0.0227	0.0019	0.2763	72.54
Rm20	0.2397	0.0630	0.0151	0.2627	84.11

(c) O.Redon

銘柄	$\sqrt{\mu_1}$	$\sqrt{\mu_2}$	α	ρ	θ
R01	0.2195	0.0768	0.0169	0.3499	98.30
R02	0.1667	0.0848	0.0141	0.5087	118.85
R03	0.2273	0.1125	0.0256	0.4950	95.73
R04	0.2120	0.1330	0.0282	0.6275	114.42
R05	0.2294	0.0562	0.0115	0.2190	52.98
R06	0.0811	0.0421	0.0034	0.5192	90.60
R07	0.1693	0.0917	0.0155	0.5413	111.16
R08	0.1854	0.1302	0.0241	0.7022	66.40
R09	0.1928	0.0756	0.0146	0.3924	83.00
R10	0.1954	0.0923	0.0180	0.4722	111.97
R11	0.2095	0.0792	0.0166	0.3783	101.86
R12	0.1831	0.1189	0.0218	0.6493	87.73
R13	0.1668	0.1360	0.0227	0.8151	178.26
R14	0.1624	0.0694	0.0113	0.4272	88.06
R15	0.1615	0.1132	0.0183	0.7013	104.88
R16	0.1736	0.0967	0.0165	0.5570	125.62
R17	0.1641	0.0922	0.0151	0.5618	54.53
R18	0.1926	0.0907	0.0175	0.4706	73.46
R19	0.2152	0.0843	0.0181	0.3917	81.15

(d) C.Monet

銘柄	$\sqrt{\mu_1}$	$\sqrt{\mu_2}$	α	ρ	θ
Mo01	0.1313	0.0653	0.0086	0.4975	121.41
Mo02	0.1131	0.0710	0.0080	0.6282	87.02
Mo03	0.1437	0.0878	0.0126	0.6111	18.84
Mo04	0.1163	0.0436	0.0051	0.3752	132.06
Mo05	0.1134	0.0631	0.0072	0.5563	108.26
Mo06	0.1723	0.1247	0.0215	0.7239	152.12
Mo07	0.1481	0.0522	0.0077	0.3527	11.37
Mo08	0.1297	0.0830	0.0108	0.6396	166.57
Mo09	0.2273	0.1002	0.0228	0.4406	76.14
Mo10	0.1457	0.0864	0.0126	0.5934	47.88
Mo11	0.1692	0.0694	0.0117	0.4101	33.83
Mo12	0.1584	0.1306	0.0207	0.8249	0.22
Mo13	0.1393	0.0667	0.0093	0.4786	126.06
Mo14	0.1518	0.0834	0.0127	0.5492	108.27
Mo15	0.1712	0.0832	0.0142	0.4859	113.95
Mo16	0.1788	0.0738	0.0132	0.4126	79.75
Mo17	0.1617	0.0693	0.0112	0.4290	82.44
Mo18	0.1606	0.0770	0.0124	0.4795	87.70
Mo19	0.0945	0.0511	0.0048	0.5406	164.39
Mo20	0.2254	0.0699	0.0137	0.2703	176.28
Mo21	0.0666	0.0410	0.0028	0.6291	135.69
Mo22	0.1253	0.0777	0.0097	0.6204	102.60
Mo23	0.0883	0.0753	0.0066	0.8528	5.68
Mo24	0.1211	0.0744	0.0090	0.6148	8.68

(e) R.Dufy

銘柄	$\sqrt{\mu_1}$	$\sqrt{\mu_2}$	α	ρ	θ
D01	0.1708	0.0919	0.0157	0.5380	87.40
D02	0.1522	0.0455	0.0069	0.2990	95.96
D03	0.1368	0.0475	0.0065	0.3471	86.28
D04	0.1205	0.0642	0.0077	0.5331	81.53
D05	0.1976	0.0641	0.0127	0.3243	98.49
D06	0.2088	0.0593	0.0124	0.2839	97.64
D07	0.1272	0.0467	0.0059	0.3671	92.79
D08	0.1220	0.0617	0.0075	0.5058	60.26
D09	0.1375	0.1045	0.0144	0.7099	156.61
D10	0.1306	0.0929	0.0121	0.7112	59.51
D11	0.1109	0.0519	0.0058	0.4679	13.83
D12	0.1497	0.1131	0.0169	0.7557	163.60
D13	0.2034	0.1026	0.0209	0.5044	177.56
D14	0.1834	0.0679	0.0125	0.3704	91.47
D15	0.1655	0.0849	0.0141	0.5129	97.30
D16	0.1897	0.0800	0.0112	0.5727	101.49
D17	0.1477	0.1102	0.0163	0.7161	91.26

(f) P.Klee

銘柄	$\sqrt{\mu_1}$	$\sqrt{\mu_2}$	α	ρ	θ
K01	0.0602	0.0334	0.0021	0.5709	72.13
K02	0.1692	0.1054	0.0178	0.6228	26.13
K03	0.1692	0.0447	0.0049	0.4091	3.66
K04	0.1266	0.0685	0.0083	0.5681	23.87
K05	0.0682	0.0349	0.0024	0.5111	98.93
K06	0.1301	0.0455	0.0059	0.3498	173.01
K07	0.1515	0.0733	0.0111	0.4842	88.94
K08	0.0950	0.0279	0.0027	0.2940	9.57
K09	0.0606	0.0202	0.0012	0.3329	2.97
K10	0.1726	0.1235	0.0213	0.7153	140.93
K11	0.1396	0.0497	0.0069	0.3560	163.27
K12	0.1000	0.0188	0.0019	0.1878	93.05
K13	0.0675	0.0503	0.0034	0.7448	159.92
K14	0.0921	0.0552	0.0051	0.5976	1.29
K15	0.1532	0.0338	0.0052	0.2207	90.97

(※ページにラフ)

(f) P.Klee (ツブき)

銘柄	$\sqrt{\mu_1}$	$\sqrt{\mu_2}$	α	ρ	θ
K16	0.0914	0.0703	0.0064	0.7694	34.39
K17	0.0776	0.0525	0.0041	0.6768	82.01
K18	0.1391	0.0864	0.0120	0.6208	28.75
K19	0.0621	0.0353	0.0022	0.5680	155.82
K20	0.1837	0.1522	0.0280	0.5282	76.27
K21	0.0546	0.0234	0.0013	0.4277	4.47
K22	0.0396	0.0273	0.0015	0.9422	168.19
K23	0.0840	0.0579	0.0049	0.6891	78.65
K24	0.0983	0.0321	0.0032	0.3266	91.21
K25	0.2385	0.1037	0.0247	0.4349	113.65
K26	0.0716	0.0544	0.0039	0.7594	100.04
K27	0.1264	0.1009	0.0127	0.7984	132.64
K28	0.1543	0.0753	0.0116	0.4883	87.32
K29	0.1720	0.0764	0.0131	0.4445	93.84
K30	0.1868	0.0774	0.0145	0.4140	3.56

(g) F.Marc

銘柄	$\sqrt{\mu_1}$	$\sqrt{\mu_2}$	α	ρ	θ
Ma01	0.1796	0.0969	0.0174	0.5393	110.41
Ma02	0.1178	0.1061	0.0125	0.9002	1.18
Ma03	0.1354	0.0881	0.0137	0.5672	158.33
Ma04	0.1650	0.0823	0.0136	0.4989	45.09
Ma05	0.1403	0.0774	0.0109	0.5512	89.03
Ma06	0.1259	0.0929	0.0117	0.7382	106.69
Ma07	0.1888	0.0724	0.0137	0.3833	175.66
Ma08	0.2205	0.1064	0.0235	0.4827	164.03

(h) M.Utrillo

銘柄	$\sqrt{\mu_1}$	$\sqrt{\mu_2}$	α	ρ	θ
Ut01	0.1710	0.1073	0.0184	0.6278	82.30
Ut02	0.1884	0.1381	0.0260	0.7334	132.44
Ut03	0.1586	0.1136	0.0180	0.7163	60.37
Ut04	0.1864	0.0639	0.0119	0.3428	96.64
Ut05	0.1752	0.1098	0.0192	0.6267	78.17
Ut06	0.1479	0.1008	0.0149	0.6816	54.77
Ut07	0.1561	0.1077	0.0168	0.6899	109.14
Ut08	0.2120	0.0905	0.0192	0.4272	83.82
Ut09	0.2102	0.1354	0.0285	0.6442	93.52
Ut10	0.1362	0.1160	0.0158	0.8515	56.52

(右上につづく)

(h) M.Utrillo (ツブき)

銘柄	$\sqrt{\mu_1}$	$\sqrt{\mu_2}$	α	ρ	θ
Ut11	0.1803	0.0755	0.0136	0.4190	79.61
Ut12	0.2064	0.0700	0.0144	0.3390	88.36
Ut13	0.2045	0.0819	0.0167	0.4003	105.50
Ut14	0.1727	0.0680	0.0118	0.3938	94.82
Ut15	0.2053	0.1512	0.0310	0.7366	144.30
Ut16	0.1640	0.0880	0.0095	0.3335	94.75
Ut17	0.1613	0.1314	0.0212	0.8149	164.33
Ut18	0.1636	0.0940	0.0154	0.5749	66.13
Ut19	0.2042	0.0881	0.0180	0.4314	102.26
Ut20	0.2035	0.0838	0.0170	0.4117	76.90
Ut21	0.1458	0.0961	0.0140	0.6586	109.76
Ut22	0.2154	0.0658	0.0142	0.3056	73.71
Ut23	0.2017	0.1113	0.0225	0.5518	95.59

(i) 梅原

銘柄	$\sqrt{\mu_1}$	$\sqrt{\mu_2}$	α	ρ	θ
Um01	0.1528	0.0690	0.0105	0.4519	94.62
Um02	0.1620	0.0442	0.0072	0.2729	87.16
Um03	0.1561	0.0641	0.0096	0.4271	102.52
Um04	0.1332	0.0422	0.0056	0.3166	88.18
Um05	0.1910	0.0518	0.0099	0.2710	89.64
Um06	0.1530	0.0812	0.0124	0.5305	80.89
Um07	0.1581	0.0880	0.0141	0.5634	111.82
Um08	0.1356	0.0737	0.0100	0.5436	82.07
Um09	0.2050	0.0666	0.0124	0.2954	94.90
Um10	0.1933	0.0767	0.0148	0.3970	88.50
Um11	0.1721	0.0894	0.0154	0.5196	105.74
Um12	0.1918	0.0395	0.0076	0.2057	88.22

(j) 木村

銘柄	$\sqrt{\mu_1}$	$\sqrt{\mu_2}$	α	ρ	θ
Ki01	0.1888	0.1224	0.0231	0.6484	127.67
Ki02	0.1791	0.1003	0.0180	0.5601	26.67
Ki03	0.1619	0.0737	0.0119	0.4553	165.02
Ki04	0.1580	0.1110	0.0175	0.7024	168.52
Ki05	0.1925	0.1744	0.0336	0.9059	129.31
Ki06	0.1477	0.0848	0.0125	0.5742	166.13
Ki07	0.1302	0.0715	0.0093	0.5491	145.60
Ki08	0.2261	0.1404	0.0317	0.6209	172.47
Ki09	0.1747	0.1142	0.0199	0.6536	158.62
Ki10	0.1849	0.1197	0.0221	0.6475	194.60
Ki11	0.1680	0.1246	0.0209	0.7416	26.99

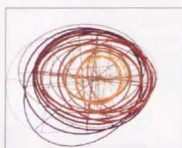
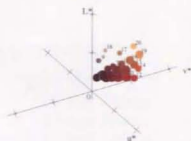
7.2 色彩構成楕円の大きさによる分析

まず、表 7.1 の結果から、最小および最大の α をもつ作品を選出する。

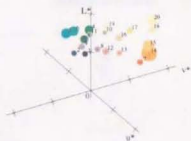
図 7.4 の (a):P.Klee の K09 が最小の α をもつ作品であり、(b): 木村の Ki05 が最大の α をもつ作品である。

(a) の K09 は、画面中央部が黄みを帯び明るく、周辺部に移るにしたがい色濃さを増す。一見して均整のとれた色彩構成であることがわかる。色彩構成楕円の長径も短径も極めて小さい例である。

(b) の Ki05 は、ほぼ正方形の画面が上中下に三分され、上段はあざやかな橙、中段は緑・青緑、下段はあざやかな黄に一部橙と緑が流れ込んだダイナミックな構図である。色彩構成楕円は丸く、長軸は傾いている。



(a) α 最小の (均整のとれた色配置の) 作品 (K09)



(b) α 最大の (ダイナミックな色配置の) 作品 (Ki05)

図 7.4: α が最小および最大となる作品

全183作品を α の大きさによって整理し、 α の小さい方から10作品、 α の大きい方から10作品を、表7.2および図7.5に示す。

表 7.2: α の小さい作品および大きい作品各 10 点

α の小さい作品			α の大きい作品		
順位	作品	α	順位	作品	α
1	K09	0.0012	1	Ki05	0.0336
2	K21	0.0013	2	Ki08	0.0317
3	K22	0.0015	3	Ut15	0.0310
4	Rm19	0.0019	4	Ut09	0.0285
5	K12	0.0019	5	R04	0.0282
6	K01	0.0021	6	K20	0.0280
7	K19	0.0022	7	Ut02	0.0260
8	K05	0.0024	8	R03	0.0256
9	K08	0.0027	9	C11	0.0256
10	Mo21	0.0028	10	K25	0.0247



(a) α の小さい (均整のとれた色配置の) 作品 10 点

図 7.5: α の小さい作品および大きい作品各 10 点



(b) α の大きい (ダイナミックな色配置の) 作品 10 点

図 7.5: α の小さい作品および大きい作品各 10 点 (つづき)

α の小さいものに P.Klee の作品が多いのが特徴的である。絵をみれば、いずれも色彩構成の均整がよくとれていることがわかる。

これに対し、 α の大きい方の作品は、いずれも同一色が画面の大きい領域を占め、画面をおおまかに分割していることが分かる。

各画家の作品群ごとに、 α の最大値、最小値、平均値、標準偏差をグラフにしたものが図 7.6 である。

このグラフから、P.Klee と Rembrandt の作品群は、とくに色彩構成の均整がよくとれていることがわかる。ただし、P.Klee は標準偏差が大きく、このことから、P.Klee は色彩構成の面でも種々の実験的試みを行なっていることがうかがえる。

平均的に α が大きく、画面を大きく分割した色彩構成の作品が多いのは、木村忠太である。M.Utrillo もそのような傾向がみられるが、彼の作品群はほとんどが街角の写生であり、画面の色彩構成を計算せずに、見たままに色づけをしたのではないかと推測される。

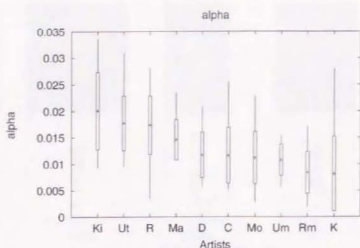


図 7.6: 作品群ごとの α

7.3 色彩構成楕円の形と向きによる分析

図 7.5 に示した α の小さい作品の中で、K12 は $\sqrt{\mu_1}$ に比べ $\sqrt{\mu_2}$ がとくに小さい。すなわち、 ρ が小さく色彩構成楕円が細長い。絵を見てわかるように、左右に線対称の色彩構成をもっている。

α の大小にこだわらず、色彩構成楕円の長径と短径の比 ρ の値に従い全作品を整理し、 ρ の小さい順および大きい順にそれぞれ 5 作品づつを取り上げ、表 7.3 及び図 7.7 に示す。

ρ の小さい作品には、色彩構成の線対称性がみられる。K12, Um12, R05, および K15 は左右対称の色彩構成をもつし、Rm16 は上下対称の色彩構成をもつ。

ρ の大きい作品については、その色彩構成に共通の解釈はできない。たとえば、Ki05 や Ma02 は“ダイナミック”という語がふさわしい色彩構成であるが、K22 や C16 は均整のとれた色彩構成である。

各画家の作品群ごとに、 ρ の最大値、最小値、平均値、標準偏差をグラフにしたものが図 7.8 である。

表 7.3: ρ の小さい作品および大きい作品各 5 点

ρ の小さい作品			ρ の大きい作品		
順位	作品	ρ	順位	作品	ρ
1	K12	0.1878	1	K22	0.9422
2	Um12	0.2057	2	Ki05	0.9059
3	R05	0.2190	3	C04	0.9009
4	K15	0.2207	4	Ma02	0.9002
5	Rm16	0.2441	5	C16	0.8619

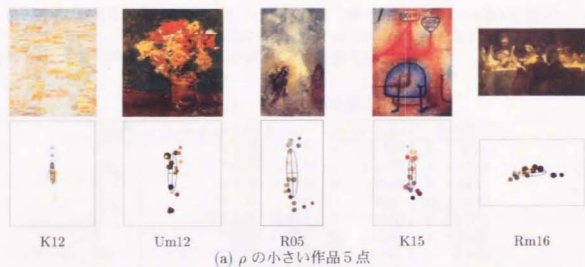


図 7.7: ρ の小さい作品および大きい作品各 5 点

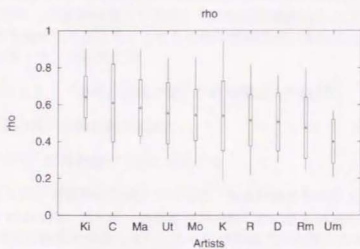


図 7.8: 作品群ごとの ρ

色彩構成に線対称が見られる絵画として、 $\rho \leq 0.4$ であるものを全183作品から選出し、さらに左右対称か上下対称かを判別するために、 $|\theta - 90^\circ|$ が 10° 以下となるもの、 80° 以上となるもの、それ以外のものの三種に分類してみた(表7.4)。

表 7.4: $\rho \leq 0.4$ となる作品の分類

作品群	$\rho \leq 0.4$ となる作品数	$ \theta - 90^\circ \leq 10^\circ$	$ \theta - 90^\circ \geq 80^\circ$	その他
C	5	3 (60.0)	0 (0.0)	2 (40.0)
Rm	7	2 (28.6)	1 (14.3)	4 (57.1)
R	5	4 (80.0)	0 (0.0)	1 (20.0)
Mo	3	0 (0.0)	1 (33.3)	2 (66.7)
D	6	6 (100.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
K	7	3 (42.9)	3 (42.9)	1 (14.3)
Ma	1	0 (0.0)	1 (100.0)	0 (0.0)
Ut	5	4 (80.0)	0 (0.0)	1 (20.0)
Um	6	6 (100.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
Ki	0	-	-	-
合計	45	28 (62.2)	6 (13.3)	11 (24.4)

その結果、まず、線対称がみられるもの($\rho \leq 0.4$)は45作品であり、全体の約1/4であること、木村の作品群には $\rho \leq 0.4$ のものはないこと、がわかった。さらに、線対称がみられる45作品中、左右対称のものは28作品で約62%を占め、上下対称のものはわずか6作品(13%)であることがわかった。また、作品群ごとにみると、C.Monetの作品には左右対称のものがないこと、これに対し梅原とR.Dufyの作品はすべて左右対称であること、P.Kleeの作品は左右対称の数と上下対称の数と同じであること、それ以外の作品群はいずれも左右対称のものが多いことがわかった。

7.4 まとめ

この章では、まず画面上の色彩構成を表わす統計量の幾何学的表現として、'色彩構成楕円'を定義した。つぎに、色彩構成楕円を規定する幾何学的諸量にもとづき、10人の画家の絵画作品の色彩構成を分析したところ、これらの量が色彩構成の対称性あるいは均整度とよく対応することが示された。具体的には

- 色彩構成楕円の大きさ(長径と短径の積)が色彩構成の均整度に、
- 形(長径と短径の比)が線対称の程度に、
- 向き(長径の方向)が対称軸の方向に対応する

ことがわかった。とくに、対称軸の方向については、左右対称のものが上下対称のものよりはるかに多いことがわかった。さらに、各画家の作品群ごとに色彩構成の特徴を調べたところ、P.Kleeの作品は他の画家の作品と比べ、とくに色彩構成が均整であることがわかった。

色彩構成楕円を規定する幾何学的諸量は、色彩構成を特徴づける意味の明解な量であり、6章で述べた配色楕円体と同様、画像検索に有効に利用できるであろう。

8 終章

8.1 各章の要約

本論文では、数理的手法と計算機の情報処理能力を駆使して、絵画に内在する色彩美の構造の抽出を試みた。

第2章と第3章は、後続する章の理解に必須の基礎概念の提示である。

第2章では色彩科学・色彩工学上の知見をできるかぎり簡潔にかつ数学的な厳密さを損なわずに導入した。

第3章では、色彩画像や色分布の概念構成から始めて、意味ある色彩情報の抽出のために必要な代表色抽出の技法までを述べた。とくに代表色抽出においては、基本となるアルゴリズムこそ既知のものではあるが、逐次クラスタ分割法としての適用ならびに実用上のさまざまな工夫や、得られた知見は新規のものである。なお、第2章、第3章の内容は、現実の色彩情報処理ソフトウェアとして実現された。詳細は文献 [81, 82] に記した。

第4章以後には、本研究の主たる成果を述べた。

第4章では、まず、この章を含め、以後で共通して分析の対象とする絵画作品（10画家、183作品）を紹介し、その色彩的特徴を簡潔に述べた。つぎに、いくつかの絵画作品を例に、その色分布に、実用の場で使われる種々の配色形式＝配色構造が見られることを示した。ここに見られる配色構造は、原画像の色分布においては、過多の情報に隠されて見えないものである。さいごに、データソースにかかわる問題を論じた。なお、この章の内容の一部は、すでに文献 [83] に報じた。

第5章では、まず、離散色分布間の類似度を定める方法に内在する問題点を述べた。つぎに、離散分布を直接比較し、分布間の距離を定義する方法を示した。二つの離散分布の対応を、線形計画法の一つである輸送問題とみなすことにより、最小費用流が距離を与える。こうして得られた、(距離の公理を満たす) 離散分布間の距離は、色分布に限らず多方面への利用が考えられる。

この章の後半では、得られた離散分布間の距離の応用として、画像の色分布の類似度による分類の実例を示した。第一の応用は、いわゆる階層的クラスタ分析である。3人の画家 Caravaggio, M. Utrillo, および F. Marc の作品 50 点について FN 法を適用したところ、きわめて良好な分類結果が得られた。なお、階層的クラスタ分析では、初期のクラスタ分割から始めて、近隣関係にあるクラスタを逐次統合するアルゴリズムを用いるが、このアルゴリズムにはクラスタを再構成するフィードバック機構がないため、多量のデータの分類にはむかない。筆者は、データの最近隣関係を用いて初期クラスタを形成する改良 FN 法 (ND-FN 法) を考案し、適用したところ、やはり良好な結果を得た。第二の応用は、10 画家それぞれの作品群の間の類似度分析である。群間距離と群内距離を計算し、作品群間の近隣関係を分析したところ興味深い結果を得た。この章の最後で、画像の類似度と画像検索の問題につい

て検討を加えた。この章の内容は、国際会議 [84] に報じた。

第6章では、色分布を代表する統計量と配色構造との関連を調べた。色分布の位置、大きさ、形状を、分布の平均および分散共分散行列の固有値、固有ベクトルといった統計量で代表する。これらの統計量を色空間における偏差楕円体—配色楕円体と呼ぶ—で表わし、配色楕円体と配色構造との対応をみた。配色楕円体の中心位置は絵全体の色彩的印象に、大きさはコントラストの大小に、形や向きは配色構造の複雑さや種類に対応することが観察された。これらの諸量により、10画家の183作品中から典型的な配色構造をもつ作品を選別した。また、各画家の作品群ごとに、配色構造上の特徴を述べた。この章の内容は、国際会議 [85] に報じた。

第7章では、2次元画面における色分布、すなわち画面上の色彩構成について論じた。3次元の分布を代表する統計量を偏差楕円体で表わしたのと同様に、2次元の色配置を代表する統計量を偏差楕円—色配置楕円と呼ぶ—で表わした。画像を構成する各代表色ごとの色配置楕円の配置は、画面全体における色彩構成の特徴を表わす。そこで、色配置楕円の中心の配置を、さらに新たな偏差楕円—色彩構成楕円—で表わし、色彩構成楕円の大きさ、形、向きにより、10画家の全183作品から典型的な色彩構成をもつ画像を選別する。また、これらの諸量により各画家ごとに作品群の特徴をみた。なお、この章の研究は、初期の研究 [11] の内容を発展させたものである。

8.2 今後の課題と展望

本論文では割愛したが、色彩美の源泉として絵画以外の資料、たとえばデザイン画、日本の古代服飾における重ね、「パーソナルカラー」で使用されている色票・色布類等々を対象に、配色構造の客観的な分析 [38, 39, 40, 41] を現在試みつつある。

色彩構成の分析に関しては、画面上の位置の変化にともなう色の变化などを考慮にいれた概念構成や分析手法を確立する必要がある。このような考えから現在、隣接色の色差に着目した色彩分析を進めつつあり、新しい知見も蓄積されつつある [86, 87, 88, 89]。

色空間上の色分布と画面上の色配置の双方にかかわる問題として、絵のもつリズム、流れ、動き、タッチ、マチエ、さらには形態的構図の分析は、残された今後の課題である。

本論文で得た結果をもとに、計量言語学や計量文献学等で用いられている統計的手法を駆使することによって、分析内容をさらに深めることも、今後の課題である。

第2章で論じたように、分析に際して色をどのように表わすか、すなわち色空間をどう選ぶかは問題のあるところではある。今回、国際的に広く通用するCIEの均等色空間を利用したが、人間の色彩感覚をよりよく表わす色空間の利用が望ましいことは明らかである。その意味から、Munsell色票系やNCS色票系を用いた分析を現在試みているが、結果は、CIEの色空間における結果を裏付けるものとなっている。いずれ結果をみて公表したい。

* * *

絵画の色彩美の構造分析は、第一歩を記したにすぎないが、色彩計画や色彩教育への応用、さらには芸術的創造へ至る道を作るには、この一歩は必須の一歩であろう。人間側からの発想に基づき、現代の科学・技術を利用することによって、この道を実現できるものと、筆者は考えている。

謝辞

はじめに、この論文を提出する機会を与えてくださいました、東京大学工学部の伏見正則教授、電気通信大学の阪田省二郎教授ならびに小林欣吾教授に深く感謝いたします。

この研究をはじめるにあたり、数々の方々のお力添えをいただきました。日本色彩学会会長・東京芸術大学教授 小町谷朝生先生、日本色彩学会関東支部長・文化女子大学教授 北畠雅先生、(株)カラープランニングセンター取締役 永田泰弘先生には、芸術・デザインあるいは色彩教育・色彩計画の面からの数々のご助言、励ましのお言葉をいただきました。

京都大学数理解析研究所の田村明久先生には、分布間の距離概念に関しご教示いただきました。それをきっかけに、離散分布間の距離の定義ならびに証明を行なうことができました。

国立歴史民俗博物館の鈴木卓治さん、電気通信大学で研究補助をお願いしている高橋みのりさんならびに吉識香代子さんには、研究協力者として有意義な討論や資料収集、資料整理に、多くの時間をさいていただきました。とくに鈴木卓治さんには色彩画像処理のソフトウェア開発にも、専門的な能力を発揮していただきました。これらの方々との協力なしには、この研究は実らなかったと思います。深く感謝いたします。

私が色彩の研究を始めてから、じつに多くの方々が私の色彩学の知識を正し、色彩計画や色彩教育など実践の現実を教えてくださいました。ひとりひとりお名はあげませんが、これらのすべての方々から感謝の気持ちを表わします。

さいごに、研究に専念できる環境を与え、陰ながら私を支えてくれた家族に感謝します。

参考文献

- [1] Kemp, M.: *The Science of Art — Optical themes in western art from Brunelleschi to Seurat*, Yale University Press, 1990.
- [2] Gage, J.: *Colour and Meaning — Art, Science, and Symbolism*, Thames and Hudson, 1999.
- [3] Birkhoff, G. D.: *Aesthetic Measure*, Harvard University Press, 1933.
- [4] Moon, P. and Spencer, D. E.: Geometric Formulation of Classical Color Harmony, *JOSA*, Vol. 34, No. 1, pp. 46-59 (1944).
- [5] Moon, P. and Spencer, D. E.: Area in Color Harmony, *JOSA*, Vol. 34, No. 2, pp. 93-103 (1944).
- [6] Moon, P. and Spencer, D. E.: Aesthetic Measure Applied to Color Harmony, *JOSA*, Vol. 34, No. 4, pp. 234-242 (1944).
- [7] 佐川賢, 清水豊: 色彩パターンの心理評価, 日本色彩学会誌, Vol. 19, No. 1, pp. 19-28 (1995).
- [8] Hård, A. and Sivik, L.: Outlines of a Theory of Colours in Combination, *Man-Environment-Systems*, Vol. 9, No. 4,5 (1979).
- [9] Sivik, L. and Hård, A.: On Studying Color Combinations — Some Reflexions and Preliminary Experiments —, Technical report, Color Report F22, Scandinavian Colour Institute AB (1989).
- [10] 小林光夫, 山口雄太: 絵画の色彩分析の試み — 色分布の広がりに着目して, 電気通信大学紀要, Vol. 7, No. 1, pp. 23-32 (1994).
- [11] 小林光夫, 三木智靖: 絵画の色彩分析の試み — 画面上の色の配置に着目して, 電気通信大学紀要, Vol. 8, No. 1, pp. 23-32 (1995).
- [12] 小林光夫, 鈴木卓治: 絵画の色彩分析の試み — 色分布の形状による絵画の分類, 電気通信大学紀要, Vol. 9, No. 2, pp. 1-19 (1996).
- [13] Kobayasi, M. and Suzuki, T.: Quantitative Analysis of Color Features in Paintings — Classification based on Distance of Color Distribution in Color Space —, *Proceedings of AIC Color 97 Kyoto* (1997).

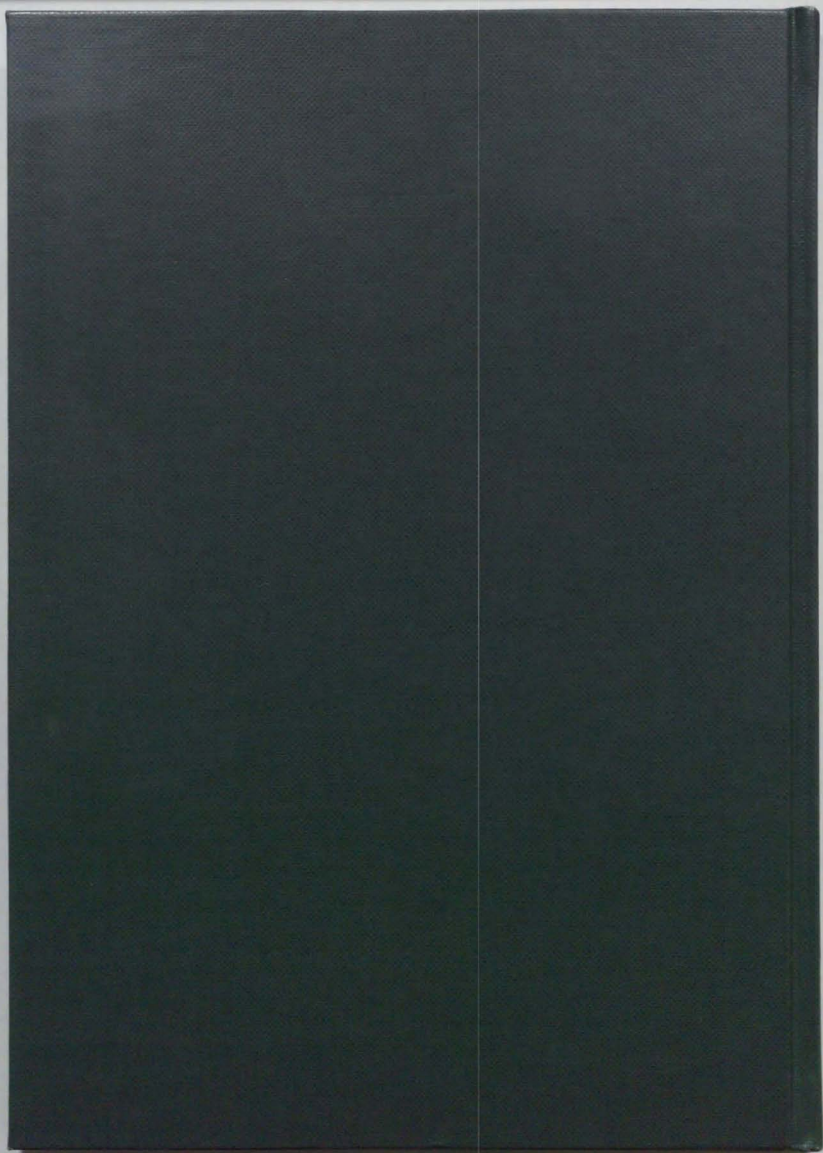
- [14] 日本色彩学会 (編): 新編色彩科学ハンドブック, 東京大学出版会, 1980.
- [15] 日本色彩学会 (編): 新編色彩科学ハンドブック, 東京大学出版会, 第2版, 1998.
- [16] Wyszecki, G. and Stiles, W. S.: *Color science concepts and methods, quantitative data and formulae*, John Wiley & Sons, 2nd edition, 1982.
- [17] 大田登: 色再現工学, コロナ社, 1997.
- [18] 小林光夫: 等色関数と基本分光感度の従属性に関する数学的考察, 平成10年度日本色彩学会関西支部大会講演論文集, pp. 22-23 (1999).
- [19] 小林光夫, 吉識香代子: スペクトル軌跡が満たすべき条件と基本分光感度の計算, 日本色彩学会誌, Vol. 23, supplement, pp. 18-19 (1999).
- [20] 池田光男: 色彩工学の基礎, 朝倉書店, 1990.
- [21] *Publication No.15.2 CIE(Colorimetry(2nd Edition))*, CIE (1986).
- [22] JIS Z 8701 (XYZ表色系及び $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系による色の表示方法), 日本工業規格 (1982).
- [23] JIS Z 8729 ($L^*a^*b^*$ 表色系及び $L^*u^*v^*$ 表色系による物体色の表示方法), 日本工業規格 (1990).
- [24] JIS Z 8721 (色の表示方法 — 三属性による表示), 日本工業規格 (1993).
- [25] *SS 01 91 00 E (Colour notation system(NCS))*, SIS, Stockholm, 2nd edition (1990).
- [26] PCCS ハーモニックカラーチャート 201-L 解説書, 日本色研事業 (株), 1991.
- [27] JIS Z 8720 (測色用の標準の光及び標準光源), 日本工業規格 (1983).
- [28] Kang, H. R.: *Color Technology for Electronic Imaging Devices*, SPIE, 1997.
- [29] JIS Z 8721 準拠標準色票 (光沢版), 日本規格協会, 第8版 (1993).
- [30] Giorgianni, E. J. and Madden, T. E.: *Digital Color Management — Encoding Solutions*, Addison-Wesley, 1998.
- [31] Nayatani, Y.: Revision of the chroma and hue scales of a nonlinear color-appearance model, *Color Res. Appl.*, Vol. 20, pp. 143-155 (1995).
- [32] Y. Nayatani, K. H., H. Sobagaki and Yano, T.: Lightness dependency of chroma scales of a nonlinear color appearance model and its latest formulation, *Color Res. Appl.*, Vol. 20, pp. 156-167 (1995).
- [33] Hunt, R.: An improved predictor of colorfulness in a model of vision, *Color Res. Appl.*, Vol. 19, pp. 23-26 (1994).

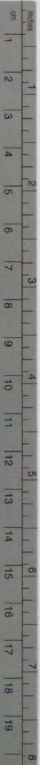
- [34] *CIE TCI.34, The CIE 1997 Interim Colour Appearance Model(Simple Version), CIECAM97s* (April, 1998).
- [35] 小林光夫, 山口智弘: Munsell-NCS 直接変換プログラムの開発, 日本色彩学会誌, Vol. 21, supplement, pp. 10-11 (1997).
- [36] 小林光夫, 吉識香代子: NCS-XYZ 間の実用的な相互色値変換プログラムの開発, 日本色彩学会誌, Vol. 22, supplement, pp. 108-109 (1998).
- [37] 小林光夫, 吉識香代子: PCCS-Munsell 間の相互色値変換, カラーフォーラム JAPAN'98 論文集, pp. 5-8 (1998).
- [38] 小林光夫, 根本優美子, 鈴木卓治: 「アフリカン・エスニック・デザイン」における配色パターンのコンピュータによる分析, 日本色彩学会誌, Vol. 21, supplement, pp. 86-87 (1997).
- [39] 小林光夫, 深野雅章: “The Color Key Program” および “Color Me a Season” の測色的分析, 日本色彩学会誌, Vol. 22, supplement, pp. 100-101 (1998).
- [40] 小林光夫, 國松亮: 日本色彩大鑑〈古代の色〉の色譜の測色的分析, 日本色彩学会誌, Vol. 22, supplement, pp. 66-67 (1998).
- [41] 小林光夫, 鄭興蕃: 日本色彩大鑑〈江戸の色〉の測色的分析, 日本色彩学会誌, Vol. 23, supplement, pp. 102-103 (1999).
- [42] 小林光夫, 室屋泰三: 超関数による測色量の表現, 日本色彩学会誌, Vol. 23, supplement, pp. 14-15 (1999).
- [43] 小林光夫, 和田仁孝: 測色的な白み・黒み・色みの計算と種々のトーンデータの分析, 平成9年度日本色彩学会関西支部大会講演論文集, pp. 24-25 (1998).
- [44] 小林光夫: 画像の有限色近似に対する数理的考察と LBG アルゴリズムの適用, 情報処理学会第46回(H5前期)全国大会講演論文集, Vol. 4, pp. 365-366 (1993).
- [45] Linde, Y., Buzo, A. and Gray, R.: An Algorithm for Vector Quantizer Design, *IEEE Transaction on Communications*, Vol. COM-28, No. 1, pp. 84-95 (1980).
- [46] Düchting, H.: *Wassily Kandinsky*, Benedikt Taschen, 1995.
- [47] Ségué, E. A.: *Exotic Floral Patterns in Color*, Dover, 1974.
- [48] 小林光夫, 鈴木卓治: 逐次クラスタ化法を用いた画像の色彩分析, 日本色彩学会誌, Vol. 19, supplement, pp. 72-73 (1995).
- [49] 粟津原禎子: 色彩分析における近似画像の色数と誤差, 1995年度卒業論文, 電気通信大学情報工学科 (1996).

- [50] 小林光夫, 栗津原禎子, 鈴木卓治: 色彩分析のための代表色抽出における色数の判定基準について, 日本色彩学会誌, Vol. 21, supplement, pp. 90-91 (1997).
- [51] 小林光夫, 鈴木卓治, 栗津原禎子: 絵画の色彩分析のための代表色抽出における実用上の工夫, 日本色彩学会誌, Vol. 22, supplement, pp. 106-107 (1998).
- [52] 諸川春樹 (監修): 西洋絵画史, 美術出版社, 1996.
- [53] 新潮 世界美術辞典, 新潮社, 1985.
- [54] オックスフォード 西洋美術事典, 講談社, 1989.
- [55] Chilvers, I.: *Concise Dictionary of Art and Artists*, Oxford, 1996.
- [56] Olivetti 1994 年カレンダー, Milano, 1994.
- [57] Bockemuhl, M.: レンブラント, ベネディクト・タッシェン出版, 1998.
- [58] 東京国立近代美術館 (編): オディロン・ルドン展—光と闇, 東京新聞社, 1989.
- [59] 千足伸行 (監修): パリ・マルモッタン美術館所蔵モネと印象派展カタログ, 日本テレビ放送網, 1992.
- [60] 国立西洋美術館 (編): デュフィ回顧展カタログ, (株) 求龍道, 1967.
- [61] ビエール・ブーレーズ (笠羽映子訳): クレーの絵と音楽, 筑摩書房, 1994.
- [62] 週間グレートアーティスト 23, 同朋舎出版, 1997-07-10.
- [63] 朝日新聞文化企画局大阪企画部 (編): モーリス・ユトリロ展カタログ, 朝日新聞文化企画局大阪企画部, 1992.
- [64] 東京国立近代美術館 (編): 梅原龍三郎遺作展カタログ, 朝日新聞社, 1988.
- [65] 東京国立近代美術館 (編): 木村忠太展カタログ, 読売新聞社, 1994.
- [66] 北島耀: 色彩演出辞典, セキスイインテリア (株), 1990.
- [67] 大井義雄, 川崎英昭: カラーコーディネーター入門 色彩, 日本色研, 1996.
- [68] Martínez, K.: Recent Progress in Arts Computing and its Applications, *Proc. 5th International Conference on High Technology (Chiba, JAPAN)*, pp. 63-68 (1996).
- [69] Farrell, J. E., Cupitt, J., Saunders, D. and Wandell, B. A.: Estimating Spectral Reflectances of Digital Images of Art, *Proc. International Symposium on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives (Chiba, JAPAN)*, pp. 58-64 (1999).
- [70] 日本数学会 (編): 数学辞典 [第3版], 岩波書店, 1985.

- [71] 小林光夫, 鈴木卓治: 色分布の客観的形狀分析による絵画の特徴抽出, カラーフォーラム JAPAN'96 論文集, pp. 87-90 (1996).
- [72] 木戸睦彦: 線形計画法 現代数学レクチャーズ A-6, 培風館, 1980.
- [73] 小林光夫, 鈴木卓治: 色分布の類似性に基づく絵画の分類, 日本色彩学会誌, Vol. 21, supplement, pp. 84-85 (1997).
- [74] Vicario, E. (ed.): *Image Description and Retrieval*, Plenum Press, 1999.
- [75] Swain, M. J.: Interactive Indexing into Image Databases, *SPIE*, Vol. 1908, pp. 95-103 (1993).
- [76] Gagliardi, I. and Schettini, R.: A method for the automatic indexing of colour images for effective image retrieval, *The New Review of Hypermedia and Multimedia 1997*, pp. 201-224 (1997).
- [77] Schettini, R., Ciocca, G. and Gagliardi, I.: Content-based Color Image Retrieval with Relevance Feedback, *Proceedings of 1999 IEEE International Conference on Image Processing*, Vol. 3, pp. 75-79 (1999).
- [78] Prokop, R. J. and Reeves, A. P.: A Survey of Moment-Based Techniques for Unoccluded Object Representation and Recognition, *CVGIP: Graphical Model and Image Processing*, Vol. 54, No. 5, pp. 438-460 (1992).
- [79] Faloutsos, C., Barber, R., Flickner, M., Hafner, J., Niblack, W., Petkovic, D. and Equitz, W.: Efficient and Effective Querying by Image Content, *Journal of Intelligent Information Systems*, Vol. 3, pp. 231-262 (1994).
- [80] 田中豊, 垂水共之, 脇本和昌: パソコン統計解析ハンドブック II 多変量解析編, 共立出版, 1984.
- [81] 小林光夫, 鈴木卓治: 画像の数量的色彩分析システムの開発, 人文科学とコンピュータシンポジウム (じんもんこん'99) 採択論文集, pp. 29-36 (1999).
- [82] Suzuki, T. and Kobayasi, M.: A Software System for Multilateral Color Analysis of Art Images, *Proceedings of International Symposium on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives (Chiba, Japan)*, pp. 139-142 (1999).
- [83] 小林光夫: 色彩美の探求 — 配色問題へのアプローチ, カラーフォーラム JAPAN'95 論文集, pp. 37-44 (1995).
- [84] Kobayasi, M.: Classification of Color Combination based on Distance between Color Distributions, *Proceedings of 1999 IEEE International Conference on Image Processing (Kobe, Japan)*, pp. 70-74 (1999).

- [85] Kobayasi, M.: Analysis of Color Combination in Fine Art Paintings, *Proceedings of International Symposium on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives*(Chiba, Japan), pp. 65-72 (1999).
- [86] 小林光夫, 鈴木数代: 隣接色の色差による絵画の色彩分析の試み, 日本色彩学会誌, Vol. 22, supplement, pp. 56-57 (1998).
- [87] Kobayasi, M.: Analysis of Colors in Art through Distribution of Color Difference, *Proceedings of Oslo International Colour Conference (Oslo, Norway)*, pp. 147-148 (1998).
- [88] Kobayasi, M.: Quantitative Analysis of Color in Fine Art Paintings — Comparative Analysis of the Usage of Chiaroscuro by Caravaggio and Rembrandt, *Proceedings of Color Interaction 1999 (Sydney, Australia)* (1999).
- [89] Kobayasi, M. and Suzuki, T.: Characterization of Paintings by means of Juxtaposed Color Difference, *Color Forum JAPAN '99 Proceedings (Tokyo, Japan)* (1999).





Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM Kodak

Blue	Cyan	Green	Yellow	Red	Magenta	White	3/Color	Black
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

