色彩学 第3巻 第1号 2024年 12－16

特集「色彩科学と情報技術の融合による文化財研究」
Special Issue: The fusion of color science and information technology for research on cultural properties

絵画画像の計量的な色彩分析の試み

A trial of color analysis of paintings by recursive step-function system considering the composition of painting art

室屋 泰三 国立新美術館
Taizo Muroya The National Art Center, Tokyo

キーワード：絵画画像，色変化，計量的分析，再帰的分割，完全正規直交系，適応的基底関数
Keywords：painting art, recursive division, adaptive basis function, color analysis

1. はじめに

さまざまな絵画作品の高精細デジタル画像がインターネットに公開され，それらを対象として絵画の色彩情報を分析できるようになった．本稿では，それら高精細な絵画画像を通して，絵画作品の画面上にある色彩の特徴について計量的に分析する方法を解説する．絵画作品を視覚的に鑑賞するだけではなく，あたかも人体をCTスキャナで検査するように，絵画画像の「見かた」を変えて観察することで絵画の中の色彩に関する新たな「気づき」を得ること，もしくは「気づき」に対する計量的な「裏付け」を得ることを目指す．

2. 色変化の計量的な分析

絵画画像の画面上の色情報について平均，標準偏差などといった統計量，ヒストグラムや色成分ごとの画像（例えば，明度画像や彩度画像，特定色相の色のみの画像）のほか，エッジ検出のように局所的な色変化に注目する方法，色空間上での分布等様々な見かたがある．ここでは画面上の色の配置によって生じる色変化に着目して，その変化の強さを計量することを試みる．色はその配置により，役割を変えて，見る者にさまざまな印象を与える．画面の上の色彩，すなわち「画像色彩」の効果について分析するために，画面上に配置された色の間の差を測ることにする．以下，絵画画像をCIELABで表色するものとし，画面上の点 (x, y) に対応する関数 $f(x, y)$ を色成分L*値，a*値，b*値を返す関数 $L^*(x, y)$，$a^*(x, y)$，$b^*(x, y)$ のいずれかと考えることとする．

3. 画面上の「領域」

画面上の色の配置を考える際，「どこ」の色を考えるのかということに注意する必要がある．画面上の色を取得する最小単位は画素であるが，画面上の色の効果を計量するためには，画素単位の色情報ではなく，画面を構成する領域（部分画像）に対応した色，例えば平均色や代表色を扱った方が良い．「領域」は絵画の画面上にさまざまなスケールで存在している．すなわち，

- 構図がもたらす「領域」
- 構図を構成する事物がもたらす「領域」
- 構成要素を描写する筆致等がもたらす「領域」
- 画素がもたらす，最小の「領域」

図1に示すパウル・クレーの作品のように画面全体に対してゆるやかに変化する色彩とその上にちりばめられた小さなドットが織りなす構成のように，色の

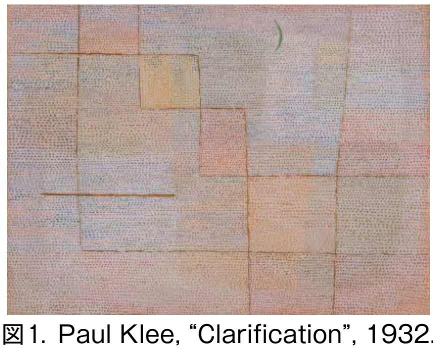

図1. Paul Klee, “Clarification”, 1932.

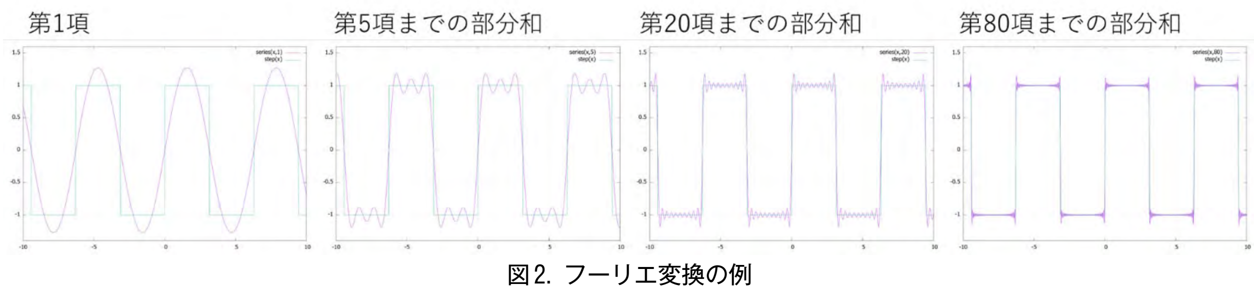

図2. フーリエ変換の例

配置は「階層的」,「重層的」に在る．階層的，重層的に在る領域の間の色変化もさまざまなスケールで重なり合っていると考えられる．そこで，重層的に重なり合った色変化を分解して計量できる方法を考えることとする．

4. フーリエ変換

重層的な色変化を分解して計量するための数学的な道具として「フーリエ変換」がある．数学的には，図2に示すように三角関数に重みを乗じて足し合わせることで，いろいろな関数のグラフを作ることができる．逆も成り立ち，ある関数を三角関数の組み合わせで表すことができる．これをフーリエ変換という．組み合わせの元となる関数を「基底関数」と呼び，基底関数の集まりを「基底系」という．三角関数のうち，cos 関数を使う離散コサイン変換（DCT）は画像解析によく使われる方法である．DCT では画面上の色変化を cos 関数の組み合わせと捉える．DCT の基底関数である cos 関数は滑らかな変化を持つ（連続な）関数である．しかしながら，画面上の色変化には，滑らかな色変化，例えばグラデーションだけではなく，不連続な変化がたくさんある（表現によっては不連続だらけである）．不連続性を持つ色変化に対して，連続な基底関数ではなく，不連続性を持つ基底関数を検討する．

5. 基底関数に求められる性質

ある関数が基底関数となるためには「完全性」,「正規性」,「直交性」の3つの数学的な性質を備えていなければならない．このような性質を持つ関数の集まりを，特に「完全正規直交系」という．これら3つの性質を色変化の計量という視点で見ると，以下のようなこととなる．

完全性＝取りこぼしが無いように測る
正規性＝大きな波長に対する変化も小さな波長に対する変化も平等に扱う
直交性＝重複して測らない

完全正規直交系 $\{\varphi_n\}$ について

$$c_n = \int_S f(x,y)\varphi_n(x,y)dxdy$$

とすると，

$$f(x,y) = \sum_n c_n \varphi_n(x,y)$$

が成り立つ．c_n を展開係数と呼ぶ．不連続性を持つ完全正規直交系として Haar 基底が有名である．Haar 基底の展開係数は画面の縦横方向それぞれを再帰的に2等分した領域について，その平均色差に重みを乗じた値となる．このことは色変化の分析に役立つ．しかし，領域を2等分して平均色を求めることから，必ずしも色の配置がもたらす変化をそのまま計量しているわけではない（図3）．

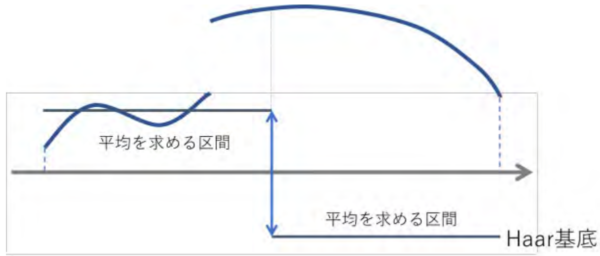

図3. Haar基底における平均色差

そこで画面上の色変化に適応した基底関数を定義することを試みる．すなわち，完全正規直交系の性質を備え，展開係数が（Haar 基底と同様に）平均色差の意味を持ち，その平均色を求める区間を機械的に2等分するのではなく，図4に示すように画面上の色変化に適応して分割する基底関数を求めるという問題を考えることとする．

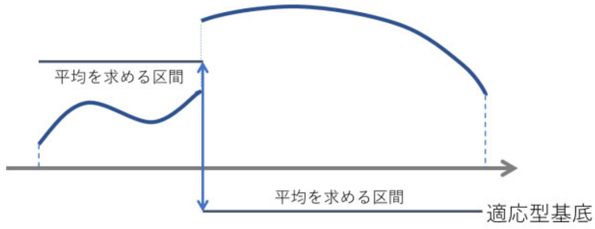

図4. 適応型基底における平均色差

6. 画面の再帰的分割による完全正規直交系

色彩画像上の矩形領域 S を縦方向または横方向のいずれかについて2分割した矩形領域を S', S'' とする．ここで，$S=S'\cup S''$ である．また，S', S'' は各矩形領域の面積を示すものとする．本稿ではまず画面を横方向に分割し，その後，それぞれの領域を縦方向に分割することとし，以降，横→縦→横→…というように各領域をそれぞれ分割することとした（図5）．簡単のため，


図5. 再帰的な2分割手順

横方向の分割から始めているが，本来ならば，分割を縦横のどちらから始めるかについては，対象とする色彩画像ごとに定めるべきである．

画面全体S_0から再帰的に分割した領域群$\{S\}$について完全正規直交系$\{\varphi_S\}$が構成できる．領域Sに対応する基底関数φ_Sは，Sの分割S'，S''について，

$$\varphi_S(x)=\begin{cases}\sqrt{\dfrac{S''}{S'(S'+S'')}}\,(x\in S')\\ -\sqrt{\dfrac{S'}{S''(S'+S'')}}\,(x\in S'')\\ 0\,(x\notin S)\end{cases}$$

となる．なお，$\varphi_{S0}(x)=1/S_0$である．この完全正規直交系$\{\varphi_S\}$による関数fの展開係数は

$$c_s=\int_S f(x,y)\varphi_S(x,y)dxdy$$

$$=\sqrt{\frac{S'S''}{S'+S''}}\left\{\frac{1}{S'}\int_{S'} f(x,y)dxdy-\frac{1}{S''}\int_{S''}f(x,y)dxdy\right\}$$

である．展開係数c_sは，

(S'でのfの平均値$-S''$でのfの平均値)×重み

を意味している．

7. パワースペクトル

完全正規直交系による関数fの展開係数の二乗和は関数fのL^2ノルム（関数fの「大きさ」に相当する量）に等しい．これをPersevalの等式という．展開係数の二乗和について，その部分和を考えることにより，展開係数の定義域の大きさ（面積）に応じた色変化の「強さ」を定義できる．

$$\int_S f(x,y)^2dxdy=\sum_{S',S''}{c_s}^2$$

$$=\sum_{S',S''}\left\{\sum_{S'\fallingdotseq 2^{-k},S''\fallingdotseq 2^{-l}}{c_s}^2\right\}$$

部分和の取り方により，絵画画像の構図等に対応することも可能である．すなわち，

$$\int_S f(x,y)^2dxdy=\sum_n {c_S}^2$$

$$=\sum_{構図に対応する領域}c_S^2+\sum_{事物等に対応する領域}c_S^2+\sum_{筆致等に対応する領域}c_S^2$$

よって，領域の大きさごとに部分和を求めることとする．ここではHaar基底との比較を行うことを考慮し，領域の面積の画面全体に対する比率について2のべき乗を基準に分類した．以上により，展開係数c_Sの部分二乗和について，

$$p_{k,l}(f)=\left(\sum_{S'\fallingdotseq 2^{-k},S''\fallingdotseq 2^{-l}}{c_s}^2\right)^{1/2}$$

を関数fに対する色変化の強度を示す「パワースペクトル」または「色変化強度」と呼ぶ．

8. 応用例—絵画画像のクラスタリング

適応型基底の応用例として，8名の作家の182点の作品について，各作品画像それぞれについてのL^*，a^*，b^*値のパワースペクトルをまとめたベクトル（ここでは，867次元ベクトル）により，絵画画像の最長隣接法による階層化クラスタリングを試み，図6，図7にあげたように同一作家の作品から成るクラスタを多数得た．よく似た構図とは言えない作品についても，平均色差に起因した計量によって同一作家の作品としてクラスタが生成されたことは興味深い．一方で，図8のように，うまくクラスタリングされていない例もある．画面の色彩配置等を計量に反映させるような改良が必要であると思われる．

9. 任意形状の領域に対する基底系の構成

完全正規直交系$\{\varphi_n\}$は領域の面積により決まり，形状にはよらない．すなわち，領域の形状は任意に設定することができる．画面全体を任意形状に2つの領域に分割し，それぞれをさらに2つに分割する，というように再帰的に領域分割を行う．ただし，任意といっても各分割の段階において得られる領域については，

・領域は他の領域と共通部分を持たない

・領域の和集合は画面全体である

の条件を満たすものとする．この（条件付きではあるが）任意形状の分割による基底生成は，分割の自由度が高いことから，画面全体からの分割のほか，同一色を持つ複数の画素から成る微細な色面から領域を組み立てる方法を試みている．

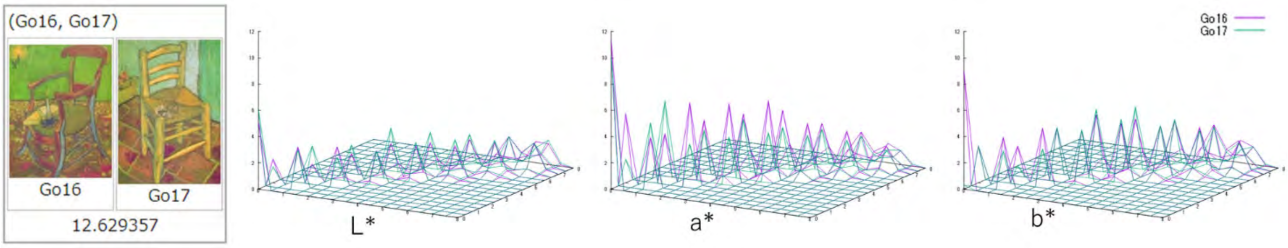

図6. ゴッホの２つの「椅子」から成るクラスタとクラスタリングに用いたパワースペクトルの比較

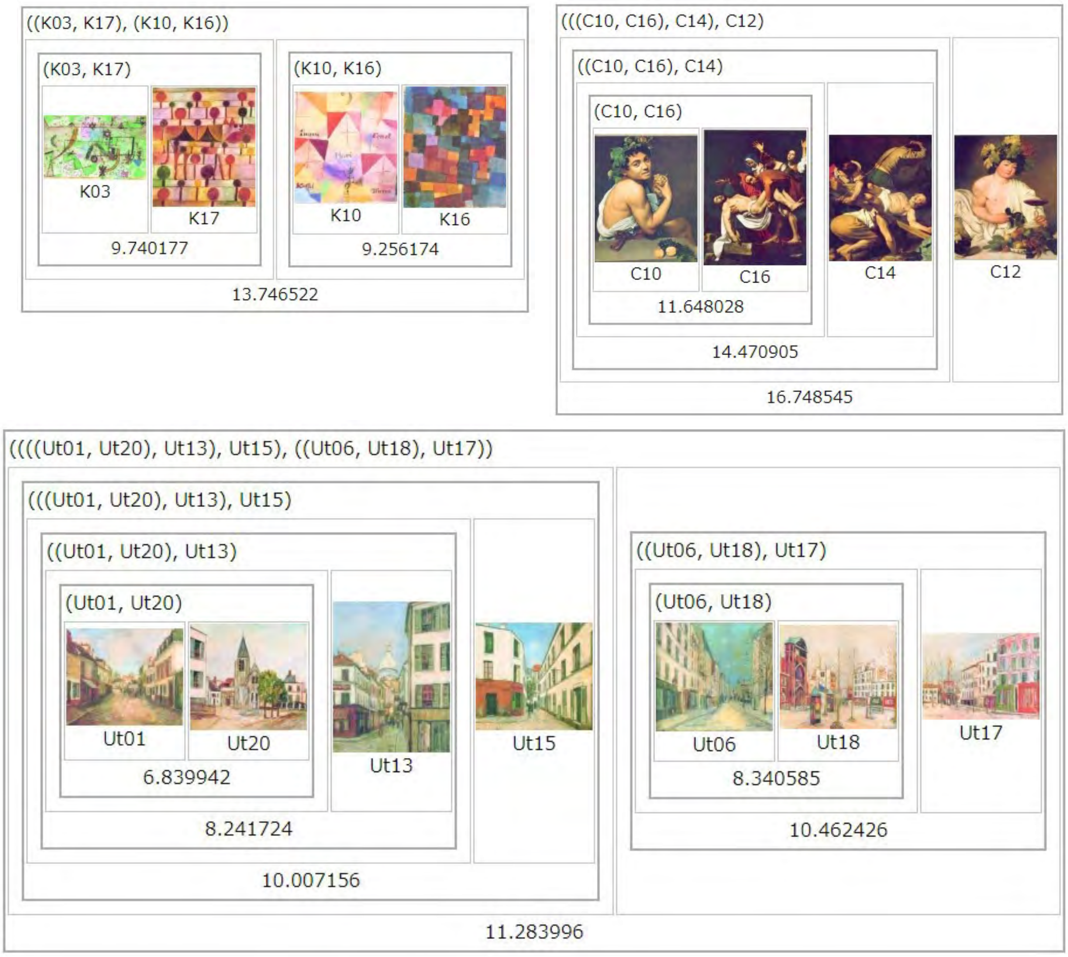

図7. 同一作家（K＝クレー，C＝カラヴァッジョ，Ut＝ユトリロ）の作品から成るクラスタの例

図8. クラスタリングがうまくいっているとは言えない例
（Go＝ゴッホ，K＝クレー，Mo＝モネ）

10. おわりに

本研究の目的は絵画作品をはじめとする色彩画像の色変化の強さを測る「モノサシ」を作ることである．美しさそのものを測ろうという試みではない．色変化に関する尺度を作ることにより，作品や作家の「個性」，「特徴」を客観的に比較することができればと考えている．機械学習（AI）により同じようなことができるのではないか，という見方もあるだろう．しかしながら，（現状の？）AIでは画像の分類はできても，その裏側にある「意味」を見出すことはできない．AIだけではわからないような部分を補完することが計量的分析手法の意義であると考える．

参考文献

1） Mituo Kobayasi, Taizo Muroya, "A Spatial Wave-length Analysis of Coarseness or Fineness of Color Variation in Painting Arts", Elsevier, Pattern Recognition Letters, Vol.24 (11), pp. 1737-1749, 2003.

2）小林光夫，絵画における色彩美の数理的分析，東京大学，1999.

3）室屋泰三，再帰的2分割による任意波長を持つ階段関数系による絵画画像の色彩変化の計量の試み，日本色彩学会平成30年度全国大会，2018.

4）室屋泰三，絵画画像の微細色面の再構成に基づく色彩分析の試行，日本色彩学会令和4年度研究会大会，2022.