

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：82621

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K00997

研究課題名（和文）カラー映画フィルムのスペクトル分析に基づく忠実な色再現と褪色補正に関する基盤研究

研究課題名（英文）Faithful Color Reproduction and Faded Color Correction: Approaches Based on Spectral Analysis of Color Film

研究代表者

大傍 正規（DAIBO, MASAKI）

独立行政法人国立美術館東京国立近代美術館・企画課・主任研究員

研究者番号：40580452

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、カラー映画フィルムの分光透過スペクトルに対して主成分分析を行うことにより、当該フィルムの色彩の分光特性を把握した上で、その測色値と等しいスペクトルをデジタル映写環境において忠実に再現する手法を確立した。その結果、カラーグレーダーによる官能評価に基づいたシーン毎のグレーディングを経ることなく、フィルム・ルックと等しいデジタル色再現を行うという当初の研究目的を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国立映画アーカイブが所蔵するカラー映画フィルム（白黒も含む）に本研究の成果を援用することで、映画コレクション全体を最適にデジタル化する道筋をつけることができた点において、大きな社会的意義を有する。その一方で、褪色したカラー映画の褪色補正に基づく色再現手法については、褪色色素による着色解析が必要であることが判明し、スペクトル分析に基づく原理確認のさらなる検討が不可欠であることが明らかになった。本件については、色再現手法の開発、その妥当性や信頼性の検証について今後の課題を把握するに留まった。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted principal component analysis on the spectral transmission spectrum of color motion picture film to understand the spectral characteristics of the film's colors, and established a method to faithfully reproduce a spectrum equal to the colorimetric value in a digital projection environment. As a result, the initial research objective of digital color reproduction equal to the film look was achieved without having to go through a scene-by-scene grading process based on sensory evaluation by a color grader.

研究分野：文化財科学、デジタル・アーカイブ、映画復元

キーワード：映画保存 デジタル色再現 主成分分析（PCA）

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

- (1) 過去 100 年以上にわたり、映画フィルムは撮影や上映用のフォーマットとして広範に使用されてきた。ところが、映画製作から興行にいたる全領域でデジタル技術が浸透し、国立映画アーカイブ(以下、NFAJ と表記する)や、一部の名画座等を例外として、DCP(デジタル・シネマ・パッケージ)等のデジタル・メディアによる上映形態が一般的となった。映画フィルムをめぐる状況は近年、ますますその厳しさを増している。それでも映画フィルムは、NFAJ 相模原分館のフィルム収蔵庫のような低温低湿(温度 2-10°C、相対湿度 35-45%)の環境下であれば、100 年単位での長期保存が可能であり、優れた保存メディアとしての重要性に変わりはない。とはいえ、フィルム映写がデジタル映写に完全に取って代わられる時期が刻々と迫っている中で、映画の誕生からこれまでに製作された旧作映画の大部分は未だフィルムの形態のままであるため、今後見込まれているのは、映画をフィルムで見るといふ真正な映画体験の喪失はもちろん、旧作のデジタル上映用素材が枯渇するという、より深刻な事態である。未来の映画観客に向けて、旧作映画のフィルム遺産への長期的なアクセスを維持するためにも、NFAJ が所蔵する旧作映画フィルムの最適なデジタル化と、フィルム・ルックと等しい色再現の手法の開発が現在の最重要課題となっている。
- (2) 中規模以上の映画館での上映に耐えうるデジタル上映素材を作製するには、ポスト・プロダクション(ポストプロ)において映画フィルムのデジタル・スキニングから、画像の修復作業やグレーディング(色彩補正)を行った上で、高解像度の DCP を作製しなければならない。映画製作者側が映画完成時と同等の真正な映画体験を提供するには、相応の経費をかける必要があるため、旧作映画の DCP 化はまだ限定的にしか実施されていない。たとえ旧作のカラー映画の DCP 化が着手されたとしても、映画の色彩を思いのままに操作できるデジタル技術が浸透したことで、立ち合い者やカラーグレーダーの裁量により映画完成時とは異なる色再現が行われる場合もあり、定量的な指針がないのが現状である。また、映画フィルムに記録された映像をデジタル化する場合には、各種フィルム・スキャナーを用いて行われることが一般的だが、得られるデータにはスキャナー依存性があり、フィルムの色彩がどのように数値化されるかはブラックボックスとなっているため、真正な色再現を行うにはスキャナーの分光特性を把握することが不可欠である。
- (3) 一般にカラーフィルムはイエロー(Y)、マゼンタ(M)およびシアン(C)の 3 色の色材によって画像が形成されているため、フィルムに記録された画像のスペクトルを測定し、その主成分分析(Principal Component Analysis、PCA)を行うことは、色の解析に有効である。PCA は一般的な数学的手法であるが、カラーサイエンスの分野にも応用されている¹⁾。太田はカラーフィルムに使われている色材のスペクトルを予想するために、フィルムに記録された種々の分光スペクトルに対して PCA を行った第一人者であり²⁾、近年も B.Flueckiger らによって、アグファカラーフィルムの色材の分光スペクトルを求める際に PCA が活用されている³⁾。

2. 研究の目的

- (1) 本研究は、カラー映画フィルムの分光透過スペクトルに対して主成分分析(PCA)を行うことにより、当該フィルムの色彩の分光特性を把握した上で、その測色値と等しいスペクトルを再現するデジタル出力値を得る手法を精緻化し、デジタル映写環境においてカラー映画フィルムの色彩を忠実に再現することを第一の目的とする。
- (2) 精度の高いスペクトル測定方法を確立したうえで、褪色の進行したカラー映画フィルムのスキャンデータに対して、映画完成時の色彩へと褪色補正を行う色再現の方法を確立することを第二の目的とする。
- (3) 最終的には、NFAJ が所蔵するカラー映画フィルムにこれらの手法を適用することで、真正性の高いデジタル復元の実施と、最適なデジタル上映・保存ワークフローの確立を目指す。

3. 研究の方法

- (1) 映画フィルムのスペクトルの主成分分析(PCA)を行うことにより、映画フィルムの分光スペクトルを精度良く取得し、デジタル映写環境における映画フィルムの忠実な色再現の手法を確立する。具体的には、あるフィルム画像中の任意の点のスペクトルを測定して PCA にかける一方で、画像全体のスキャンデータからスキャナーの特性(分光感度)を推定してスペクトル計算を行うとともに、劇場でのデジタル映写環境を想定した専用 LUT(入力と出力の対応関係が列挙された数表であり、表示デバイスや視聴環境に応じて、画像データの値を適切な出力値に変換する目的などで利用されている)を作成することで、映画フィルム現物の色彩に忠実なグレーディング作業を行う。

- (2) 完成した3D・LUTをもとにTIFFファイルでデジタル出力を行うとともに、このTIFFファイルからDCPを作製する。

4. 研究成果

(1) 2021年度

NFAJが所蔵するカラー映画フィルムの中から、色再現手法を確立するのに最適な、褪色の見られない『鎌倉カーニバル』(1951年)を選定し、NFAJが近年導入した測定アパーチャーが1mmφ単位の分光器の一部を改良して測定精度を上げるとともに、測定箇所を広範囲にとることで、当該フィルムの主成分分析(PCA)の精度向上が確認できた。NFAJ内部において、カラー映画フィルムの分光透過率データに対するPCAならびに累積寄与度の算出ができる環境は整った。しかし、NFAJが導入したフィルム・スキャナーの分光特性の把握や、大量のスキャンデータをスペクトルデータに変換するための作業環境に課題が残った。

(2) 2022年度

NFAJが導入しているフィルム・スキャナーの分光特性の把握を第一目標とし、同スキャナーでカラーチャートを撮影したフィルムをスキャンするとともに、2021年度に測定精度を向上させた分光器(JascoMV3200)を用いて分光透過スペクトルを測定し、スキャナーの分光感度を推定した。その結果、NFAJが導入しているスキャナーでは、メーカー独自の色彩強調処理が行われているために、適切な分光感度の推定ができないことが明らかになった。また同スキャナーでスキャンした画像は、彩度が著しく高いことも確認された。その一方で、2023年度に民間のポスプロが所有する高品質なスキャナーを用いてスキャンを行った後の色再現の工程を確かなものにするために、3D・LUTのたたき台を完成させ、主成分分析(PCA)による色再現プログラムを整備した。

(3) 2023年度

NFAJが所蔵するカラー映画をはじめ、『狂った一頁』[青染色版](1926年、衣笠貞之助監督)や、白黒フィルムにオレンジ染色や青調色が施された『日本南極探検』(1930年製作、1910-12年撮影)などの復元候補作の中から、色再現手法を確立するのに最適な『時をかける少女』(1983年、大林宣彦監督)の再タイミング版を選定し、2016年の同版作製時に使用した米・イーストマン・コダック社のフィルム(EK2383)を活用してデジタル色再現を行った。具体的には、『時をかける少女』のスキャンデータに対し、EK2383に焼き付けたカラーチャートおよび濃度の異なるグレーチャートの分光透過スペクトルを主成分分析(PCA)した結果を反映させて、デジタル映写環境上で同作品の分光スペクトルを再現した。

具体的な再現方法は次の通りである。

- (1) EK2383に、カラーチャートおよび濃度の異なるグレーチャートを焼き付けた上で(図1)、NFAJ相模原分館に導入している分光器(JascoMV3200)の1mmφのアパーチャーを通して、チャートの各色の分光透過スペクトルを380nm~780nmの範囲で測定した(分解能1nm)。ここで得られた分光透過率データに対してPCAを行った。その結果、第3主成分までの累積寄与率が99.95%となり、これら3成分により十分な色再現が可能になった。



図1. 色再現のPCAに使用したカラーチャートおよびグレーチャート

- (2) 次に、民間のポスプロが所有する高品質なフィルム・スキャナーを用いて、上記カラー及びグレーチャートをスキャンし、赤(r) 緑(g) および青(b)各チャンネルのデジタル出力値を得た(この際、スキャナー側が独自のカラー調整を行わないような設定を行うとともに、人為的なカラーマネージメントを実施しないよう、受注先に求めた。なお4K・DPXファイルとして出力された画像はAdobe Photoshopで読み取った)。
- (3) さらに、スキャナーの分光感度 $S_i(\lambda)$ を仮定し、グレーチャートの分光透過率を用いて計算した濃度(E_i ; $i=r,g,b$, 下記のEquation 1を参照)と、デジタル出力値との関係を示す1次式を求めた上で、カラー及びグレーチャートの分光透過率から得た濃度とデジタル出力値および、同1次式から計算した濃度が一致するように繰り返し計算を行い、ス

キャナーの分光感度を修正した。

$$E_i = \int_{380}^{780} T(\lambda) \cdot S_i(\lambda) d\lambda \quad \text{Equation 1}$$

$$i = r, g, b$$

$T(\lambda)$; Spectral Transmittance of object

- (4) 以上のように推定したスキャナーの分光感度と、カラー及びグレーチャートの主成分を用いて、デジタル出力値を画像に変換するための 3D・LUT を算出した。さらに、分光感度を推定したスキャナーを用いて『時をかける少女』[再タイミング版]のフィルムをスキャンし DPX ファイルを得た上で、この 3D・LUT を用いて TIFF ファイル（カラー空間は DCIP3）に変換した。この際、別途測定した NFAJ の上映施設である長瀬記念ホール OZU の光源およびスクリーン反射率を考慮に入れた。この TIFF ファイルをもとに、フリーソフト OpenDCP を用いて DCP を作製した。以上の画像データ変換のワークフローを図 2 に示した。

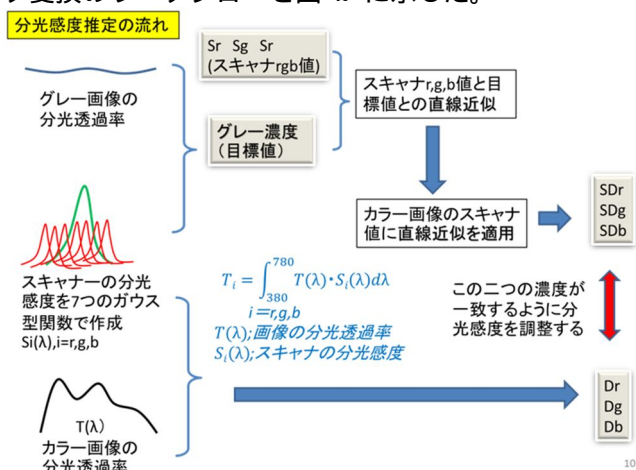


図 2 フィルム画像の色再現ワークフロー

色再現の検証結果及び考察

- 色再現の検証: EK2383 に焼き付けたカラーチャートおよび濃度の異なるグレーチャートの分光透過スペクトルから得た主成分及び赤 (r) 緑 (g) 青 (b) 各チャンネルのデジタル出力値から算出した分光濃度と、実際に測定したフィルムの分光濃度とを比較した。各スペクトルから得られた測色値 $L^*a^*b^*$ について色差 ΔE_{76} を求めた。さらに、NFAJ の上映施設である長瀬記念ホール OZU にて『時をかける少女』[再タイミング版]のフィルム上映と、デジタル色再現を行った DCP のデジタル上映とで比較検証を行った。
- 実際に測定したカラーチャートの分光濃度と、推定したスキャナー分光感度を用いて、スキャンデータから PCA に基づいて算出した分光濃度とを比較した結果、両者は良く一致していた。
- フィルムの分光濃度および PCA から算出した分光濃度と、求めた測色値 $L^*a^*b^*$ を比較した。24 色の平均色差 $\Delta E_{76} = 3.5$ であり、良い精度で元のフィルムの色を再現できることが確認できた。また、このことから、スキャナーの分光感度が精度よく推定できたと考えられる。
- NFAJ の長瀬記念ホール OZU における光源とスクリーン反射率を考慮して、デジタル色再現をした DCP と、フィルム映写した場合とを比較検討した結果、デジタル映写環境上で『時をかける少女』[再タイミング版]の分光スペクトルを再現できることを確認した。本手法では、熟練者による官能評価あるいは、カラリストによるシーン毎のグレーディングを経ることなく、計算により色再現できることを証明した。
- 比較試写後に、『時をかける少女』の映画完成時のタイミングマンであった鈴木美康氏

より、次のようなコメントを頂いた。

「全体と言える事は、グレーディング等の人間による映像調整を全く行わずに作成した DCP としては高いレベルでプリントフィルムの映像を再現している。今回の DCP 作成手法が一定のレベルで評価できる映像を作り出せたといえる。映像を比較した結果としては、コントラストと色調に差が見られる。また明暗という点では、コントラストの影響もあり全体に暗く感じられる。コントラストは、黒の浮き(黒のレベルの上昇)と白が弱い(白のレベルの低下)ためにフラットになり立体感が損なわれている。コントラストは弱い段階調表現は保たれている。色調は若干だが、“R”が強く出ており、フェイスストーンが赤みに寄り、蛍光灯のグリーンも弱くなる症状が出ている。色調のズレを感じやすい白黒のシーンが綺麗なグレーとして表現されていたのは、RGB のバランスが良い為と考えられる。」

- f) 鈴木氏より R = 赤色方向に色がずれるとの指摘があったが、スキャナー分光感度をより正確に推定することで、さらに色差が低減され、色再現が改良されと考えられる。一方、暗部の諧調が失われている、あるいは白のレベルの低下についても指摘を受けたが、これらは色再現手法の問題ではなく、スキャニング自体に起因すると思われる。ポジフィルムのスキャニングに適したスキャナーの研究も今後の検討課題である。
- g) さらに今後の課題としては、褪色した上映用プリントから褪色前を予測した DCP 作成技法の開発である。

<引用文献>

- 1) D.Tzeng, R.S.Berns, “A review of principal component analysis and its applications to color technology”, *Color research and application*, volume 30, issue 2, 2005, p84.
- 2) Noboru Ohta, “Estimating absorption bands of component dyes by means of principal component analysis,” *Analytical Chemistry*, volume 45, issue 2, 1973, pp.553.
- 3) B.Flueckiger and G.Trumpy, Presentation at FIAF 72th Congress, 26th, June(2016), Bologna.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕

大傍正規、「甦る「闇夜」の世界 『狂った一頁』[染色版]の同定と復元をめぐって」、『NFAJ ニュースレター』、査読無、16号、2022年、3-4頁。

大関勝久、「映画フィルム固有のオリジナルカラーを継承する 『カルメン故郷に帰る』の3色分解白黒ネガフィルムからの忠実な色再現の試み」、『NFAJ ニュースレター』、査読無、12号、2021年、11-13頁。

〔学会発表〕

大関勝久、大傍正規(モデレーター)「カラー映画フィルムの分光スペクトル測定と主成分分析に基づくデジタル色再現 『時をかける少女』[再タイミング版]の色再現」、科研費研究課題「カラー映画フィルムのスペクトル分析に基づく忠実な色再現と褪色補正に関する基盤研究」成果報告会(長瀬記念ホール OZU 及び国立映画アーカイブ会議室)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 大傍正規	4. 巻 なし
2. 論文標題 『南極探検活動写真』（1912）関連資料の同定研究 浅草国技館における初回興行と地方興行の諸相	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 『映画史家・塚田嘉信 そのコレクションと業績』（科研費・基盤研究(C)「塚田嘉信コレクションを起点に初期映画史を読み直す」成果報告(2020-22)）	6. 最初と最後の頁 293-351
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大傍正規	4. 巻 16
2. 論文標題 甦る「闇夜」の世界 『狂つた一頁』[染色版]の同定と復元をめぐって	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 『NFAJニューズレター』	6. 最初と最後の頁 3-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大傍正規	4. 巻 12
2. 論文標題 国立映画アーカイブにおけるコレクション形成の原点 フランソワ・ジェルジェリーの貢献	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 『NFAJニューズレター』	6. 最初と最後の頁 9-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大関勝久	4. 巻 12
2. 論文標題 映画フィルム固有のオリジナルカラーを継承する 『カルメン故郷に帰る』の3色分解白黒ネガフィルムからの忠実な色再現の試み	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 『NFAJニューズレター』	6. 最初と最後の頁 11-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大傍正規
2. 発表標題 『南極探検活動写真』（1912）関連資料の同定研究 『活動写真機械及フィルム定価表』（1912）に見る最古の長篇記録映画
3. 学会等名 「映画史家・塚田嘉信 そのコレクションと業績」（国立映画アーカイブ主催）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大傍正規
2. 発表標題 甦るコニカラー映画『生きている人形』 発掘と復元 / 林又一郎旧蔵フィルム 初代中村鴈治郎をめぐるフィルム群の発掘の経緯について
3. 学会等名 歌舞伎学会秋季大会 国立映画アーカイブ共催プログラム「歌舞伎・文楽の発掘映像を見る」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大傍正規
2. 発表標題 大隈重信と『日本南極探検』（1930年） 南極探検後援会長・大隈の功績を顕彰する映画の誕生とその歴史的背景
3. 学会等名 大隈重信没後100年記念事業 記録映画「日本南極探検」特別上映会【早稲田文化芸術週間2022】
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大傍正規
2. 発表標題 アニメーション映画のアーカイピング 高残存率を支えるフィルム発掘と複数バージョンの同定研究
3. 学会等名 日本アニメーション学会西日本支部 オンライン研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大傍正規
2. 発表標題 『狂つた一頁』（1926）の複数バージョンの同定と興行形態の変遷について
3. 学会等名 合同研究会「NFAJコレクションを活用した映画史の再検討」（国立映画アーカイブ会議室）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大傍正規
2. 発表標題 『狂つた一頁』（1926）の適切な色再現に向けて
3. 学会等名 合同研究会「スペクトル解析に基づく映画フィルムのデジタル色再現に向けて」（国立映画アーカイブ相模原分館）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大関勝久
2. 発表標題 『鎌倉カーニバル』のスペクトル解析に基づくデジタル色再現 分光器の改善とスペクトル測定方法の改良による再現手法の精緻化について
3. 学会等名 合同研究会「スペクトル解析に基づく映画フィルムのデジタル色再現に向けて」（国立映画アーカイブ相模原分館）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大関勝久、大傍正規(モデレーター)
2. 発表標題 カラー映画フィルムの分光スペクトル測定と主成分分析に基づくデジタル色再現 『時をかける少女』[再タイミング版]の色再現
3. 学会等名 科研費研究課題「カラー映画フィルムのスペクトル分析に基づく忠実な色再現と褪色補正に関する基盤研究」成果報告会(長瀬記念ホール OZU及び国立映画アーカイブ会議室)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大傍正規
2. 発表標題 映像に見る白瀬隊の偉業 最古の長篇記録映画『日本南極探検』の新発掘版をめぐって
3. 学会等名 令和5年度にかほ市郷土史市民講座（にかほ市金浦公民館 軽運動室）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大傍正規
2. 発表標題 『南極探検活動写真』（1912）南極探検隊後援会と白瀬隊による活動写真興行
3. 学会等名 NPO法人白瀬南極探検100周年記念会「調査専門委員会調査・研究・検証報告会」（SHIRASE5002）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大傍正規
2. 発表標題 南極探検記録映画の複数バージョン 1930・1950年版の同定研究
3. 学会等名 日本映像学会第49回大会（明治学院大学白金キャンパス）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	大関 勝久 (Ozeki Katsuhisa) (00774952)	名古屋大学・未来材料・システム研究所・特任教授 (13901)	大関勝久氏は名古屋大学未来材料・システム研究所特任教授の職を定年退職したため、科研費の受け入れ機関を失ったが（2022年3月28日に分担者を辞退）、2022-3年度も研究協力者として研究に従事した。

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	大関 勝久 (Ozeki Katsuhisa)		同上。

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関