

色再現性アノマリーの詳細分析：Canon EOS 5D Mark IIとレーザー励起蛍光体（LEP）光源

序論

問題提起

Canon EOS 5D Mark IIデジタルカメラを使用して、レーザー励起蛍光体（Laser Excited Phosphor、以下LEP）を光源とする白色光を撮影した際に、他のビデオカメラでは観察されない、強く持続的な紫またはマゼンタの色かぶりが発生するという現象が報告されています。この現象は、特にプロフェッショナルな映像制作の現場において、色の正確性が求められる状況で深刻な課題となり得ます。

本レポートの目的

本レポートの目的は、この色再現性のアノマリーに対して、科学的根拠に基づいた決定的な説明を提供することです。結論から述べると、この現象はカメラの故障ではなく、2008年当時のセンサー技術と、現代のLEP照明が持つ特異なスペクトル特性との間で生じ

る、予測可能なメタメリズム（条件等色）の不一致（Metameric Failure）に起因するものです。

方法論と範囲

本分析は、センサーの特性評価に関する学術研究、カメラと照明技術の技術仕様、そして確立された色彩科学の原理を統合することによって構築されます。レポートはまず、カメラのセンサー応答を解体し、次いで光源のスペクトル出力を分析します。最後に、両者の相互作用を詳細に検討することで色ずれの原因を特定し、プロフェッショナル向けの具体的な緩和戦略を提示します。

1. Canon EOS 5D Mark II センサーのスペクトル応答

このセクションでは、ユーザーの主要な要求である感度データに直接応え、カメラの撮像システムを解体し、それがどのように「色」を認識するかを基礎的理解を確立します。

1.1. デジタルカラーイメージングの基本原則

CMOSセンサーとベイヤーフィルターアレイ

Canon EOS 5D Mark IIは、36x24 mmのフルフレームCMOS（相補型金属酸化膜半導体）センサーを搭載しています¹。このセンサーの表面には、ベイヤー配列として知られるカラーフィルターアレイ（CFA）が配置されています。これは、赤（R）、緑（G）、青（B）の微細なマイクロフィルターを市松模様に並べたもので、通常、人間の視覚感度に合わせて緑のフィルターが赤や青の2倍の数配置されています³。この構造により、カメラは「色」を直接認識するのではなく、実際には異なる波長帯で3つの独立したモノクロ画像を同時にキャプチャします。これらのデータは、後の画像処理段階で補間（デモザイク処理）され、フルカラーの画像を生成します⁴。

光子からデータへ：量子効率とA/D変換

センサーが光子（フォトン）を電子（エレクトロン）に変換する効率は、**量子効率（Quantum Efficiency、QE）**として知られています⁵。QEは、センサーの感度を決定する基本的な物理量です。EOS 5D Mark IIのQEは、当時の基準では良好でしたが、現在では標準的とされる約33%です⁷。センサーで生成されたアナログの電子信号は、次に14ビットのアナログ-デジタル（A/D）コンバーターによってデジタル値に変換され、DIGIC 4イメージプロセッサによって処理されます⁸。フィルターからプロセッサに至るこの一連のパイプライン全体が、最終的なカメラの色再現性を定義します。

1.2. Canon EOS 5D Mark IIの分光感度曲線

測定データの提示

メーカーは通常、競争上の理由からセンサーの正確な分光感度データを公開しません⁹。そのため、この種の情報は学術機関や独立した研究室による精密な測定に依存する必要があります。スイス連邦工科大学ローザンヌ校（EPFL）などの研究機関は、専用の分光計（camSPECS）を用いて、380nmから1100nmの範囲で各種カメラの分光感度を測定しており、EOS 5D Mark IIのデータも公開されています¹⁰。

以下のグラフは、これらの測定データに基づいて推定されるCanon EOS 5D Mark IIのRGB各チャンネルの相対的な分光感度曲線を示しています。

(ここに、横軸を波長（nm）、縦軸を相対感度としたRGBの感度曲線グラフを挿入する。グラフは、以下の分析内容を視覚的に表現するものである)

曲線の分析

このグラフは、カメラの色再現性を理解する上で極めて重要な情報を含んでいます。

- **赤 (R) チャンネル**：赤チャンネルは、スペクトルの赤橙色部分（約600-620 nm）に主要な感度ピークを持ちます。しかし、ここで最も注目すべきは、青/紫領域（約440-460 nm）に**顕著な二次的な感度ピーク**が存在することです。この二次ピークは、ベイヤーフィルターの赤色フィルターにおける一般的な設計特性であり、本分析の中心的な要素となります。
- **緑 (G) チャンネル**：緑チャンネルの感度は、可視スペクトルの中央部（約530-550 nm）に集中しており、一般的に他のチャンネルとの重複が最も少ない「クリーンな」チャンネルです。
- **青 (B) チャンネル**：青チャンネルは、スペクトルの青色領域（約450-470 nm）に幅広い感度ピークを持っています。

ピーク波長

グラフデータから、各チャンネルの感度がピークに達するおおよその波長は以下の通りです。

- **青 (B) チャンネルピーク**：約460 nm
- **緑 (G) チャンネルピーク**：約540 nm
- **赤 (R) チャンネルピーク**：約610 nm

1.3. 測色的忠実度と2008年世代センサーの限界

ルーサー条件と人間の視覚

色彩科学において、カメラが測色的に「完璧」であるための条件は**ルーサー条件（Luther Condition）**として知られています。これは、カメラのセンサー感度が、人間の目の感度を表すCIE XYZ等色関数から線形変換で導き出せる場合に満たされます¹¹。しかし、実際にはいかなる民生用カメラもこの条件を完全に満たすことはありません。カメラがこの理想からどれだけ逸脱しているかが、そのカメラ固有の色の「ルック」を決定し、特定の光源下でメタメリズムの不一致を引き起こす可能性を内包します。

EOS 5D Mark IIのカラーサイエンス

EOS 5D Mark IIの色再現性は、物理的なフィルターの特性と、DIGIC 4プロセッサが実行する複雑な計算の産物です⁸。カメラ内部のカラーマトリックス¹²やホワイトバランスアルゴリズムを含むこれらの計算は、その開発当時（2008年）に一般的だった光源（昼光、タングステン、蛍光灯など）に対して最適化されています¹³。したがって、LEPのような現代の固体照明が持つ、極めて特殊なスペクトルスパイクを正確に解釈するように設計されてはいません。この世代的な背景が、観察されている色再現性の問題の根底にある重要な文脈です。

このカメラの撮像システムを構成する主要なハードウェアコンポーネントは、以下の表1にまとめられています。この表は、議論の対

象となる技術が2008年当時のものであることを明確に示しています。

表1：Canon EOS 5D Mark II 撮像システムの主要仕様

特性	仕様	出
センサータイプ・サイズ	CMOS・36 x 24 mm	1
有効画素数	21.1メガピクセル	2
ピクセルサイズ	6.4 μm	7
映像エンジン	DIGIC 4	7
A/D変換	14ビット	8
標準ISO感度域	100-6400	2
カラーフィルターアレイ	RGB原色フィルター（ベイヤー配列）	3
発売日	2008年9月	7

観察される紫の色かぶりは、赤と青の光が混ざった結果です。問題のLEP光源が非常に強い青色成分を持つことを考えると、この青色光がカメラの青チャンネルだけでなく、何らかの形で赤チャンネルをも刺激していると推論できます。そして、EOS 5D Mark IIの分光感度曲線を調べると、まさにその推論を裏付けるように、赤チャンネルが青色スペクトル領域に明確な二次感度を持っていることが確認されます。これにより、LEP光源の青色光が、センサーのRチャンネルとBチャンネルの両方に同時に信号を生成する直接的な物理的メカニズムが確立され、画像処理が行われる前の段階で既に紫の色かぶりの土台が形成されていることがわかります。

2. レーザー励起蛍光体（LEP）照明のスペクトルシグネチャ

このセクションでは、方程式のもう一方の要素である光源に焦点を当てます。ここでは、「白色」LEP光がスペクトル的にいかにユニークであり、従来の光源とは根本的に異なることを明らかにします。

2.1. LEP技術の解説：複合光源

動作原理

LEP光源は、高輝度の青色レーザー（通常、窒化インジウムガリウム（InGaN）製で、ピーク波長は約450 nm）を、蛍光体（多くの場合、イットリウム・アルミニウム・ガーネット（YAG）など）素子に集光させることで光を生成します¹⁵。

「白色」光の生成

蛍光体は、高エネルギーの青色レーザー光の一部を吸収し、それをよりエネルギーの低い光の広範なスペクトル（通常は黄色や緑色）として再放出します。人間の目やカメラセンサーが最終的に「白色」として認識する光は、この変換されずに残った**残留青色レーザー光**と、蛍光体から放出された**広帯域の光との混合物**です¹⁶。この複合的な性質こそが、LEPのユニークなスペクトルの鍵となります。

2.2. 白色LEP光の分光放射分布（SPD）

「スパイキー」で「ギャップのある」スペクトル

典型的な白色LEP光源の分光放射分布（SPD）グラフを分析すると、その決定的な特徴が明らかになります。

1. **青色ピーク**：レーザーの発光波長である約450 nmに、極めて顕著で、幅が狭く、エネルギーの高いスパイクが存在します¹⁹。このピークは、他のほとんどの光源の青色成分と比較して、スペクトルの他の部分に対する相対的な強度が桁違いに高いです。
2. **蛍光体ハンプ**：蛍光体からは、より幅広く、強度の低い発光が見られます。これは通常、スペクトルの緑、黄、赤の部分のカバーします。
3. **スペクトルのギャップ/ディップ**：このスペクトルは完全には連続的ではありません。青色レーザーのピークと蛍光体発光

の開始部分との間に、しばしば鋭い落ち込みや「谷」が存在します。一部の資料では、「約425 nmと475 nmに短いドロップアウトがある」と具体的に言及されています²²。

2.3. 比較スペクトル分析

LEP vs. 昼光/タングステン

太陽光や白熱電球が持つ滑らかで連続的な黒体放射曲線とは異なり、LEPのスペクトルは非常に不規則で「不自然」です²⁴。

LEP vs. 蛍光体変換型LED

どちらも青色光源を用いて蛍光体を励起しますが、LEPの励起光源はコヒーレント（可干渉性）で高輝度な**レーザー**であるのに対し、LEDでは非コヒーレントなダイオードです。この違いにより、LEPのSPDは、典型的な白色LEDと比較して、はるかに顕著で狭い青色スパイクを持つこととなります²⁰。

CRIの欺瞞性

LEP光源は高い演色評価数（CRI）を持つことがありますが、この指標はあくまで平均値であり、人間の目には「良い」光に見えても、デジタルセンサーにとっては問題となりうる重大なスペクトルピークや谷を覆い隠してしまう可能性があります¹⁸。

LEPのマーケティングで用いられる「連続スペクトル」という言葉²²は、色の正確性が求められる文脈では誤解を招く可能性があります。物理的な現実として、そのスペクトルは2つの別個のプロセス（レーザー発振と蛍光体発光）の合成物であり、滑らかさとは程遠い、非常に構造化され、不均衡なエネルギー分布を持っています。この複合的な性質と極端な青色ピークこそが、カメラのオートホワイトバランス（AWB）アルゴリズムが直面し、そして多くの場合、処理に失敗する根本的な原因です。

以下の表2は、LEPスペクトルの特異性を強調するため、他の一般的な光源との比較を示しています。

表2：主要光源のスペクトル特性比較分析

光源	スペクトルタイプ	主要なスペクトル特徴	代表的なCRI
昼光	黒体放射	滑らかで連続的な曲線	100
タングステン	黒体放射	赤色側に偏った滑らかな曲線	95-100
蛍光体変換型	複合	青色ピークと幅広い蛍光体発光	70-95
LEP	複合（レーザー発振と蛍光体発光）	極端に狭く高い青色ピーク（約450nm）、スペクトルギャップ、幅広い赤色発光	90-98

この表は、EOS 5D Mark IIが、その設計当時に想定されていた光源とは根本的に異なる、極めて特殊なスペクトルを持つ光源に遭遇しているという事実を視覚的かつテキストで補強します。これにより、色再現エラーが発生する可能性が高いことが論理的に導かれます²²。

3. 統合と分析：紫の色かぶりの起源

このセクションは本レポートの核心部分であり、前二章で提示されたデータを統合し、観察されている現象に対する決定的な説明を提供します。

3.1. 相互作用のマッピング：スペクトルの重ね合わせ

この現象を理解する最も効果的な方法は、LEP光源のSPDグラフとEOS 5D Mark IIのRGB感度曲線を概念的に重ね合わせることです。この視覚的な重ね合わせが、説明の中心となります。

この重ね合わせにより、LEPの強烈な約450 nmのレーザーピークが、カメラセンサーの感度領域とどのように相互作用するかが一目瞭然となります。

- **青 (B) チャンネル**の主要な感度領域とほぼ完全に一致します。

- **赤 (R) チャンネル**の二次的な感度ピークともほぼ完全に一致します。
- 一方で、**緑 (G) チャンネル**の感度が比較的低い領域に位置します。

3.2. 不均衡の解説：定量的なウォークスルー

このスペクトルの衝突が、センサーの各チャンネルでどのような信号を生成するかを順を追って見ていきましょう。

1. **青チャンネルの応答**：青チャンネルは、レーザーピークによって**極めて強く**刺激され、非常に高い信号値を生成します。これは期待通りの反応です。
2. **赤チャンネルの応答**：赤チャンネルは、その二次感度ピークのために、同じ青色レーザーピークによって**同様に強く**刺激されます。この応答は青チャンネルよりは弱いものの、「赤」の情報として記録されるべき信号としては不釣り合いに高くなります。これは一種の「クロストーク（混色）」と見なせます。
3. **緑チャンネルの応答**：緑チャンネルは、主に強度の低い広帯域の蛍光体発光から信号を受け取ります。強烈な青色レーザーピークは、緑チャンネルの感度の「谷」に位置するため、赤や青チャンネルに比べて相対的に非常に弱い信号しか生成しません。
4. **RAWデータの段階での結果**：この結果、ホワイトバランスや他の画像処理が適用される前のRAWデータの段階で、信号のバランスは**R (高) + G (低) + B (非常に高)**となります。これは、定義上、マゼンタまたは紫の色合いです。

この問題は、2つのスペクトルプロファイルを考慮すると数学的に避けられないものです。これは、LEPのSPDと5D Mark IIの分光感度関数の畳み込み積分の予測可能な結果です。センサーチャンネルの出力は、光源のSPDとセンサーの感度関数を全波長にわたって乗算し、積分することで得られます⁴。

数式で表すと以下のようになります：

$$\text{Signal}_R = \int \text{SPD}(\lambda) \cdot \text{LEP}(\lambda) \cdot \text{SSF}(\lambda, \text{Red}) \, d\lambda$$

$$\text{Signal}_G = \int \text{SPD}(\lambda) \cdot \text{LEP}(\lambda) \cdot \text{SSF}(\lambda, \text{Green}) \, d\lambda$$

$$\text{Signal}_B = \int \text{SPD}(\lambda) \cdot \text{LEP}(\lambda) \cdot \text{SSF}(\lambda, \text{Blue}) \, d\lambda$$

ここで、SPD_LEP(λ)が約450nmに巨大なピークを持ち、SSF_Red(λ)とSSF_Blue(λ)がその波長でゼロではない値を持つため、結果として得られるSignal_RとSignal_Bは、Signal_Gと比較して不釣り合いに大きくなります。したがって、紫の色かぶりは主観的なエラーではなく、物理法則に基づいた数学的な必然なのです。

以下の表3は、このチャンネル間の不均衡を直感的に理解するため、昼光とLEP光に対する相対的な信号強度を模式的に示しています。

表3：異なる光源に対するチャンネル応答の模式的比較

光源	Rチャンネル信号強度	Gチャンネル信号強度	Bチャンネル信号強度	結果的な色バランス
昼光 (理想)	8	8	8	バランス (ニュートラルグレー)

LEP	6	4	10	不均衡 (R+B = 紫/マゼンタ)
-----	---	---	----	--------------------

この表は、複雑なスペクトルグラフを、R+Bの不均衡という核心的な概念を即座に理解できるシンプルで直感的な数値表現に変換する強力な教育ツールとして機能します。

3.3. メタメリズムの不一致と圧倒されたプロセッサ

メタメリズムの不一致の定義

メタメリズムとは、人間の目には同じ色に見える2つの光源（メタマー）が、カメラセンサーからは異なる応答を生み出す現象です¹²。LEP光源と真の広帯域白色光源は、人間の目には同じ「白」に見えるメタマーですが、EOS 5D Mark IIのセンサーは、その違いを（悪い方向に）識別してしまいます。

IR汚染とのアナロジー

この現象を理解する上で、非常に有効なアナロジーがあります。それは、ハイブリッドRGB/IRカメラで知られている、赤外線（IR）汚染が紫の色かぶりを引き起こす問題です²⁹。

- **アナロジーの解説**：目に見えない強力なIR信号がRGBチャンネルに「漏れ込み」、カラーコレクションアルゴリズムを欺いてしまうのと全く同じように、LEPの**可視光でありながら極端に強力な青色ピーク**が同様の振る舞いをします。それは、カメラにプリプログラムされたAWBやカラーマトリックス変換では補正しきれないほどの極端な信号の不均衡を生み出します。システムがその運用設計限界を超えて押しやられているのです。

DIGIC 4プロセッサの役割

カメラのAWBアルゴリズムは、R、G、Bチャンネルのゲインを調整することで色かぶりを中和しようと試みます。しかし、これほど巨大な青色スパイクと、それによって「汚染」された赤チャンネルに直面すると、ニュートラルグレーを生成する満足のいく解決策を見つけることができず、結果として補正しきれなかった紫の色かぶりが残ってしまうのです。

4. プロフェッショナル向けの推奨事項と緩和戦略

この最終セクションでは、これまでの分析に基づいた実践的なアドバイスを提供し、ユーザーがこの現象を制御できるようにします。

4.1. 撮影現場での補正：カスタムホワイトバランスの重要性

オートホワイトバランスが失敗する理由

前述の通り、AWBアルゴリズムはLEPの特異なスペクトルによって欺かれます。アルゴリズムが想定する光源モデルから大きく外れているため、正しい補正量を計算できません。

正しい手順

この問題を解決するための最も重要かつ最初のステップは、カメラ内で精密な**カスタムホワイトバランス**を設定することです。これには、スペクトル的にニュートラルな18%グレーカードやホワイトバランス専用のターゲットを、使用する**LEP照明と全く同じ条件下**で撮影する必要があります。

- **その仕組み**：このプロセスにより、DIGIC 4プロセッサは、既知のニュートラルなターゲットをニュートラルとして再現するために必要な、R、G、Bチャンネルに対する極端なデジタルゲインを強制的に計算します。これにより、問題の光源に特化したカスタムの補正レシピが作成され、適用されます³⁰。

4.2. ポストプロダクションでのカラーコレクション

RAWデータでの作業

RAW形式（.CR2）で撮影することの重要性を強調します。RAWファイルは、センサーからのデータを最小限の処理で記録するため、後処理で補正するために必要な最大限の情報を保持しています⁸。

グレーディングソフトウェアでのテクニック

DaVinci Resolve、Adobe Premiere Pro、Lightroomなどのソフトウェアで紫の色かぶりを中和するための具体的な戦略を以下に示します。

- **ホワイトバランスツール**：シーン内の既知のニュートラルなオブジェクト（グレーカードなど）に対して、ホワイトバランスのスポイトツールを使用します。
- **カーブレベル補正**：青チャンネルや赤チャンネルのゲインを個別に引き下げるか、緑チャンネルのゲインを引き上げることで、チャンネル間のバランスを直接調整します。
- **色相 vs. 色相/彩度**：マゼンタ/紫の色相を分離し、その色相をニュートラルなグレー方向にシフトさせるか、彩度を大幅に下げることによって、色かぶりを選択的に除去します。

4.3. 高度な光学的・照明的解決策

カメラ側でのフィルタリング

カラーコレクションフィルターの使用も有効な手段です。レンズに「マイナスマゼンタ」（すなわちプラスグリーン）フィルターを装着することで、光がセンサーに到達する前に物理的に緑色成分を追加し、チャンネルバランスを整えることができます。これは、純粋にデジタルな補正よりもクリーンな結果をもたらす可能性があります。

光源の変更

大規模なプロダクションでは、LEP照明器具に直接プラスグリーンのジェル（例：Lee 244など）を貼ることで同じ目的を達成できます。これにより、セット上のすべてのカメラに対して光を事前に補正することができます。

4.4. 背景と今後の展望

新しいカメラの性能が優れている理由

現代のカメラは、より高度な映像エンジン（例：DIGIC 8/X）と、チャンネル間のクロストークが少ない、改良されたカラーフィルターアレイを搭載している可能性があります。これらのカメラのAWBアルゴリズムはより洗練されており、スパイキーなスペクトルを持つ光源を含む、より多様な現代の光源でトレーニングされている可能性が高いです。

将来の機材評価

このEOS 5D Mark IIでの経験は、カメラと照明のシステムレベルでの互換性の重要性を示す貴重な教訓となります。将来、機材を選定する際には、購入や重要な使用の前に、LEPのような扱いの難しい光源でカメラをテストすることが推奨されます。

結論

分析結果の要約

本レポートは、Canon EOS 5D Mark IIでLEP光源下で観察される紫の色かぶりが、予測可能で説明可能なメタメリズムの不一致であることを結論付けます。その原因は、LEP光源が持つ約450 nmの強烈な青色レーザーピークと、EOS 5D Mark IIセンサーの特異な分光感

度、特にその赤チャンネルが持つ二次的な青色感度との相互作用にあります。

理解によるエンパワーメント

最終的なメッセージは、エンパワーメント（権限付与）です。この相互作用の根本的な物理学を理解することで、ユーザーはもはや予測不可能なエラーの犠牲者ではなくなります。代わりに、自身の機材が持つこの特定の特性を予測し、管理し、そして補正するための知識とプロフェッショナルな技術を身につけたオペレーターとなります。EOS 5D Mark IIは、オペレーターが現代のスペクトル的に複雑な照明と組み合わせた際の運用上の特性を理解している限り、依然として非常に有能なツールであり続けます。