

## スマートフォンとネットワークサーバを用いた ユビキタスな分光画像計測システム

### A Ubiquitous Multispectral Imaging System Using Smartphone and Network Server

望 月 宏 祐\* 田 中 法 博\*\*

Kosuke MOCHIZUKI Norihiro TANAKA

#### 概要

一般ユーザが手軽にどこでも分光画像計測ができるように、スマートフォンとネットワークサーバを用いた遠隔分光画像計測手法を提案する。スマートフォンといった携帯型の情報端末は、携帯電話、小型のPC、カメラ等が統合されたことで新たな特徴を持った携帯型の情報デバイスと考えることができ、また、携帯電話網を用いてネットワークを使ってサーバや他の情報端末と連携したシステムの構築が可能となる。本研究の特徴的な点は2つあり、1つ目は、そのハードウェアの個々の性能のばらつきによる精度面を解消可能であること、2つ目はユーザに複雑な校正用のハードウェアを持たせずにスマートフォン単体で分光画像計測が利用可能であるという点である。具体的には、カラーチャートを分光光度計とカメラで計測し、分光反射率とカメラ出力の組のデータベースを構築し、データベースの分光反射率を主成分分析し、基底関数として分光反射率の統計的な特徴を獲得する。推定する分光反射率はこの基底関数の線形結合として求める。次にスマートフォンからネットワークを介して、計測した画像をサーバ上に転送し、サーバ上に保存されている基準カメラの特性や分光反射率データベースを用いて分光画像を推定する。本研究で開発したシステムの妥当性は、実際の物体を対象にスマートフォンで分光反射率を推定し、その推定値を実際のスマートフォンやPCからサーバにアクセスして確認した。

キーワード : Computer Vision、分光反射率推定、スマートフォン、ネットワーク、サーバ

#### 1. はじめに

本研究では、これまでカメラ画像から分光情報に基づいて物体の材質情報を推定し、その情報から高精度なコンピュータグラフィックス (CG) を生成するための手法を開発してきた[1-2]。

通常の画像や CG は RGB 情報に基づいて撮影

されたり生成されたりしている。しかしながら、カメラから得られる RGB 情報は撮影したときの照明環境やカメラの感度特性などに依存するため、画像情報から物体表面の物理特性等の推定が難しくなる。まず我々は、物体の色を RGB 情報ではなく物体固有の物理情報である分光反射率として

---

\*長野大学非常勤講師

\*\*企業情報学部教授

推定する手法を開発した。分光反射率は物理情報であるため、周囲の照明環境の影響やカメラの感度特性に依存しないという利点を持つ。そういった物理情報であるため、人の肌の分光反射率からメラニンやヘモグロビン量を推定するという事も可能になった[3]。また、RGB情報はCGを生成する際には複雑な光反射計算を行った場合に絶対的な精度が不足するという問題が発生する。たとえば物体間の相互反射計算において、可視波長域をたった3つのバンドで表現するRGB情報では反射回数が多くなってくると計算誤差が蓄積するという問題が生じる。また、RGB値は一般にカメラ感度や人間の視覚応答の情報も含んでいるため、相互反射のような物理的な計算の繰り返しには適していない。そのため、こういった相互反射の色を計算するときに可視波長域を高次元にサンプルして電磁波スペクトルとして計算すれば、純粋な物理計算の手法を適用することができる[4]。

このような理由から対象物体の分光反射率を知ることがコンピュータビジョンの分野や高精度なCG再現が必要な分野では重要な課題の一つとなっている。分光反射率の計測は分光光度計などを用いて計測するが、こういった特殊な計測器を使わなくても誰もが容易に分光反射率計測が可能となれば、その応用範囲は広がる。

そこで本研究では近年急速に普及しているスマートフォンのような携帯型の情報端末に着目し、それを分光情報の推定に応用することを考えた。スマートフォンは携帯電話、小型のPC、カメラ等が統合されたことで新たな特徴を持った情報デバイスであり、常時持ち運びできる携帯性に加えて、高度な情報処理ができるコンピュータと小型のカメラを搭載したカラーデバイスと考えることができる。しかも、携帯電話網を用いてネットワークを使ってサーバや他の情報端末と連携したシステムの構築が可能となる。本研究では、このスマートフォンを用いたネットワーク型の分光画像計測システムを構築する手法を提案する。

まず分光情報の計測方法について述べる。従来では分光反射率等の計測には、一般に分光測色器などの計測器が用いられる。この方法ではある一定の小領域を平均化して、ある一定面積をもった領域の分光情報を計測する。この場合、問題となることは物体表面の材質が部分的に異なったり、

テクスチャを持ったりするような対象には使用が難しいことである。こういった表面特性が不均一な物体の場合には、対象物体表面の色情報等の空間分布が計測できる画像計測が有効である。この画像計測を分光的に行ったものが分光画像計測である[5]。

本研究では、スマートフォンにこの分光画像計測機能を持たせることを目的とする。分光画像計測には、物体の分光放射輝度を直接計測する手法[6]と、分光放射輝度から照明情報等を取り除いて分光反射率として推定する手法[1]があるが、本研究では対象物体の材質の推定を目的とするため、後者の分光反射率として分光画像を獲得する。通常、分光画像計測を行うためには一般のRGB三原色よりもバンド数の多いマルチバンドカメラ[5]などの大掛かりな計測システムを用いる必要があるが、本研究の目的を達成するためには、スマートフォンで撮影した画像のRGB値から簡便に分光画像が推定できる手法が必要となる。

ただ、スマートフォンを分光画像計システムとして利用するためには、その精度面の問題を解決しなければならない。スマートフォンの精度面の問題はまず、カメラ系の性能のバラつきやスマートフォンの露光処理がブラックボックス化している問題から生じている。次に、ユーザに複雑な校正用のハードウェアを持たせることは一般に困難であるため、分光反射率の推定だけでなくスマートフォン単体で分光画像計測に関する校正処理まで行わなければならない点である。

そこで本研究では分光情報の統計的性質を利用してRGB値から分光反射率を推定する手法を採用し、それをスマートフォン用に改良する手法を提案する。この方法では、別途計測された分光情報のデータベースとスマートフォンの色情報を対応させることで高精度に分光反射率の推定を行う。

ここでは特殊なハードウェアを用いずにスマートフォンのカメラを校正する方法を提案する。この方法は、さらにブラックボックス化されたスマートフォンの露出やホワイトバランスなどの自動調整機能による露出の想定外の変化を補正するためにも用いる。このことにより市販の一般的な未校正状態のスマートフォンのカメラを校正しながら、分光画像計測を行う。

次にスマートフォンの特徴は、携帯電話網を用

いたネットワーク機能であるが、計測した分光画像はインターネットを介してサーバ上に送信されることで、サーバ上で様々な処理をすることが可能である。特に多くのユーザが計測した分光画像情報を統合して、統計処理などを用いれば単体のコンピュータで処理するよりも多くの応用可能性が出てくる。さらに事前に計測した分光反射率データベースを各スマートフォンに配布することで、個々のユーザが所有するスマートフォンの校正が可能となる。このことで特殊なハードウェアを用いずに、各ユーザが持つスマートフォンを強力な分光画像計測システムとすることができる。

ただし、本稿の範囲では、ネットワークを介したデータベースの動的な配信は行わず、それぞれのスマートフォン上に手動でダウンロードして用いることを想定している。

本稿では、このスマートフォンを用いたネットワーク型の分光画像計測システムを構築するためにサーバシステムを構築する。スマートフォンで撮影した画像をネットワーク上からデータ処理サーバに送信し、受信した画像から分光反射率を推定し、その結果をスマートフォンで確認できるようにする。

## 2. スマートフォンを用いた分光反射率の推定

本研究ではスマートフォンのカメラ画像から分光反射率を推定する。本研究で開発している分光反射率推定手法は、物体の分光反射率の統計的性質を利用し、カメラの感度特性や照明環境の影響を除去して行うものである。本稿では、文献 [1] の手法を簡略化することで、ある程度の分光反射率の推定精度を維持しながら、ユーザがどこでも分光反射率を計測できるようなシステムをスマートフォンで実現することを目指す。実際にはスマートフォンとネットワークサーバで構築したシステムに簡略化した分光反射率の推定アルゴリズムを実装する。一般に RGB 値のような低次元情報から分光情報のような高次元情報の推定は、低次元情報からの高次元情報の推定問題となり、一般的に数学的に解くことができない。そこでいくつかの知見に基づいて拘束条件を与えることで、この問題を解決する [1][6]。まず Schmitt らの研究 [7] に基づいて、分光反射率の統計的性質から分

光反射率とカメラ出力の間のシステム変換マトリックスを求める。次に分光反射率の性質に目を向けてみると、分光反射率は少数の基底関数の線形結合で記述できることが知られている。これまで Cohen [8] はマンセル色票の分光反射率が3つの主成分曲線で表現できることを示した。また Maloney [9]、Vrhel [10] らは実際の物体の表面分光反射率を調べて、少数の基底関数で物体表面の分光反射率を表現できることを示した。こういった分光情報の統計的特性を拘束条件として RGB 値から分光反射率を推定する。

ここではまずスマートフォンのカメラを分光的にモデル化する。高機能なカメラと異なり、スマートフォンのカメラは露出やホワイトバランスが自動で調整され、ユーザが直接設定できないブラックボックスとなっている。このことは安定した露光状態で画像計測ができないという問題を引き起こす。そこで、まずスマートフォンのカメラ出力のモデルを構築し、そのモデルに基づいた推定方法を開発する。図1は、本研究で構築したカメラ出力の分光モデルの概略図である。このモデルは光源からの光が物体表面で反射してカメラ系に入力するといった光反射に基づくカメラ出力 RGB 値を得るまでのプロセスを記述したものである。スマートフォンの場合には、図1の Sensitivity function が未知となる。

このカメラ系に入力される色信号から物体表面の分光反射率を推定する。分光情報は可視波長域 (400nm-700nm) を5nm 間隔でサンプリングし、61次元のベクトルとして扱う。このとき文献 [1] の方法に従って、カラーチャートを分光光度計とカメラで計測し、分光反射率とカメラ出力の組のデータベースを構築する。本稿で提案する手法では、カメラ出力は、特定のスマートフォンの感度特性を代表値として仮定しており、機器固有の感度特性を補正はしていない。次に分光反射率を主成分分析し、基底関数として分光反射率の統計的な特徴を獲得する。推定する分光反射率はこの基底関数の線形結合として求める。

この場合、3つの基底関数を用いるとすれば、分光反射率の推定問題は、RGB の3つの値から、この3つの基底関数の重み係数への線形変換に単純化できる。つまり、この重み係数が画像から推定すべき情報となる。このとき3つの基底関数に対

応する重み係数を、 $w_1, w_2, w_3$  と記述すると RGB 値と重み係数の関係は次式で示すことができる。

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで  $\mathbf{M}$  は RGB 値から  $w_1, w_2, w_3$  を求めるための  $3 \times 3$  の線形変換マトリックスである。この  $\mathbf{M}$  は基底関数と分光反射率の組から推定することが可能である[1]。

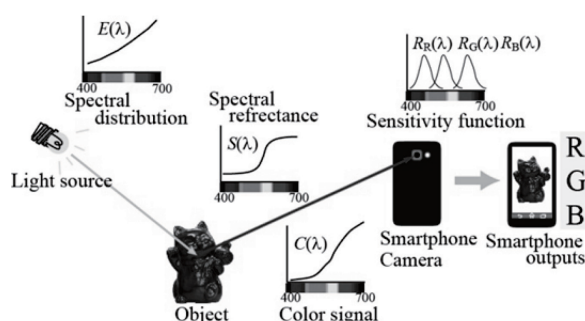


図1. カメラ出力の分光モデル

### 3. ネットワーク型の分光画像計測システム

本研究で構築する分光画像計測システムはネットワークを介することで幅広い端末（スマートフォンやPC）上で容易に分光反射率の計測ができるようにする。本研究で提案するシステムは、重要な処理はネットワークのサーバサイドで行い、クライアント側の負担を減らすようにする。図2は本研究で構築したシステムの概略図である。このシステムは、スマートフォンなどのクライアント端末とデータ処理を行うサーバシステムで構成する。このシステムは、サーバサイドに分光反射率の推定エンジンがあり、HTTP デーモンとのやり取りをするインタフェース部分から構成される。クライアント側（スマートフォン）は簡単なインタフェース用のソフトウェア（アプリ）がインストールされており、画像計測やデータ転送に関するユーザの操作を受け付ける構造になっている。ネットワークは直接インターネットに接続するか携帯電話通信網を介してインターネットに接続する。このときシステムの要件として、分光画像計測に用いるスマートフォンはカメラが搭載されていることと、ネットワークに繋がる環境であれば

このシステムを利用できる。クライアント側の処理負担は低くなるように設計されており、スマートフォンは搭載されているカメラによる画像計測、画像データのアップロード、そして推定された分光反射率の結果の確認に用いる。データ処理サーバ側ではスマートフォンからアップロードされた画像データを受信し、分光反射率のデータベースを用いて画像データから分光反射率を推定する。つまり、分光反射率の推定はサーバ上のC言語で書かれた分光反射率推定エンジンで処理される。この方式の利点はスマートフォン上では複雑な処理を行わずサーバサイドの処理エンジンで計算処理を行うことである。このため処理エンジンの更新容易性やスマートフォンの機種依存性を大幅に低下させることができる。

本研究では、分光反射率の推定エンジン部分とそのデータ受付部分以外のサーバシステムは汎用のオープンソースシステムで全体を構築する。また、通信プロトコルなどは一般的なものを使用するため、データ通信は主にHTTPデーモンを介して行う。クライアントとのデータのやり取り部分はPHPを用いて記述し、先に示した分光反射率の推定エンジンとのデータ通信処理を担当する。分光反射率推定手法の基礎的な理論は文献[1]で提案したが、本稿で示す内容はPHPで記述されたデータ通信処理システムを含めたサーバサイドのC言語で記述された分光反射率推定エンジンの具体的な実装手法となる。

サーバサイドで処理され推定された計測対象の分光反射率の推定結果は数値データとしてスマートフォン側に送信され、スマートフォンのブラウザ上でグラフ化される。このときスマートフォンとデータ処理サーバとの間の通信にはSecure Sockets Layer (SSL) に基づいてデータの暗号化通信を行い、情報の機密性を高める。

本システムの処理の流れは、まずスマートフォンで分光反射率を調べたい対象物体を画像計測する。計測で得られた画像のアップロードは、HTTPSプロトコルを使用してデータ処理サーバにアクセスし、計測条件の情報とともに計測画像をサーバに向けて転送する。そして、送られてきた情報を用いて、データ処理サーバ上に蓄えられているカメラの分光特性情報と分光反射率データベースから、分光画像を推定する。その推定結果

は、同じく HTTPS プロトコルを用いてスマートフォンに送信される。

なお、サーバとの通信は汎用のプロトコルを用いるため端末について機種や OS などに依存しない。本研究では分光画像計測の端末は Android を搭載したスマートフォンを用いているが、将来的には iPhone などへ適用可能である。

さらに計測データについては Web ブラウザから閲覧のみであるがアクセスできるようにした。

本システムは分光反射率推定エンジン以外の部分はオープンソースで提供されているソフトウェアの集合体として構築しているため、システム全体の汎用性を高めて、サーバの構築を容易にしている。また、通信方法は一般の Web アプリの手順に準拠しているため、HTTP 等を用いて一般的な PC などからも推定結果にアクセス可能である。PC から閲覧する場合のグラフのレンダリングには JavaScript と gnuplot を用いている。

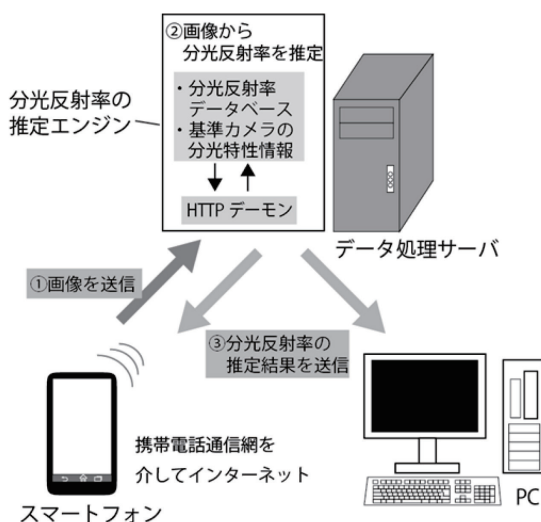


図2. 分光反射率の推定システムの概略図

#### 4. 実験

提案システムを用いて画像から分光反射率推定を行った。本実験ではスマートフォンには富士通社製の Arrows NX F-06E を使用した。搭載されているカメラのセンサは裏面照射型 CMOS で最大解像度は約1630万画素である。

スマートフォンで計測した画像データから分光反射率を推定するためのデータ処理サーバを構築

した。仕様は CPU が Core 2 Quad 9550、メモリが8GB、OS は CentOS 6.5 64bit である。HTTP サーバとして Apache 2.2.15 を用いた。サーバサイドの分光反射率の推定エンジン部分は C 言語と PHP 5.3 を用いた。実験環境は、スマートフォンを WiFi 環境により無線 LAN で接続し、ローカルエリアネットワーク内で、スマートフォンにプライベートアドレスを割り当てて、閉じたネットワーク内である。

次に、スマートフォンで撮影した画像をネットワークサーバ上に転送し分光反射率の推定を行った。計測物体は図3に示す。単色のマレットゴルフの球三つを計測した。それぞれ赤、緑、青色の球体である。分光反射率の計測部位は黄色の四角部分である。図4はスマートフォンのカメラを用いて同じ蛍光灯照明下で撮影した画像である。

図5は計測した物体の分光反射率をグラフで示したものである。(a)が赤色の球、(b)が緑色の球、(c)が青色の球を示している。今後は本システムの実用化に向けてこの分光反射率の推定精度の検証が必要である。

さらに本システムでは PC からアクセスし、PC に搭載されたブラウザ (Firefox 24.5.0) から推定した分光反射率を確認した。この PC 上で推定結果を確認している様子は図6に示す。また、スマートフォンで推定した分光反射率を表示している様子を図7に示す。

#### 5. まとめ

本稿では、一般ユーザがどこでも分光画像計測ができるように、スマートフォンとネットワークサーバを用いたユビキタスな分光画像計測手法を提案した。本研究の特徴的な点はネットワークサーバを活用することで分光反射率推定システムに新たな可能性を示したことである。具体的な特徴点は2つあり、1つ目は、そのハードウェアの個々の性能のばらつきによる精度面を解消可能、2つ目はユーザが、複雑な較正用のハードウェアを使用せずにスマートフォン単体で分光画像計測が利用可能という点である。カメラ出力と分光反射率の組をデータベース化することで、カメラ画像から分光反射率を推定することが可能となった。本研究では分光反射率の推定エンジンをサーバサイドに持たせることで、一般のスマートフォンで分光

反射率の計測が可能となった。つまり、スマートフォンとネットワークを用いたユビキタスな分光画像システムを構築できた。

ただし、現時点での本研究の問題点は、スマートフォンのカメラ感度特性をある特定のモデルとして仮定しているため、実際には個々のスマートフォンの機器の感度特性や個体差による誤差を十分に補正できていない。今後、こういった機器ごとの補正手法を開発する必要がある。

本研究によって、スマートフォンとネットワークサーバを用いて分光情報が手軽に推定できるようになったが、今後はこの推定された分光反射率をどのように活用するのかを検討していく必要がある。現時点で想定される応用としては、ユビキタス型の肌診断システムといった美容面での利用を考えている。特に本研究では、サーバ側に数多くの人の肌の情報を蓄えることができるので、肌の診断結果などを統計的に分析して肌の傷み具合の傾向を統計的に調べることができると想定される。そういった情報を用いて肌情報に関する美容データベースなどを構築したい。

## 参考文献

- [1] 田中法博、禹在勇、更科友啓、望月宏祐：分光的な光反射計測に基づいた物体の表面反射特性推定、日本感性工学会論文誌、Vol.8, No.3, pp.943-950, 2009.
- [2] 望月宏祐、田中法博、林一成、禹在勇、富永昌治：分光画像圧縮に基づいた分光ベースレンダリングの高精細化、日本感性工学会論文誌、Vol. 9, No.2, pp.301-309, 2010.
- [3] Y. Masuda, T. Yamashita, T. Hirao, and M. Takahashi: An innovative method to measure skin pigmentation, Skin Research and Technology, Vol. 15, pp.224-229, 2009
- [4] 望月宏祐、田中法博、戸谷重幸、森川英明、三浦幹彦：分光レイトレーシング法に基づいた相互反射の色再現手法、日本デザイン学会誌「デザイン学研究」、Vol.60, No.1, pp.11-20, 2013.
- [5] K. Tonsho, Y. Akao, N. Tsumura, and Y. Miyake: Development of goniophotometric imaging system for recording reflectance spectra of 3D objects, SPIE Proceedings, 4663, pp. 370-378, 2001.
- [6] 田中法博、望月宏祐：RGBカメラによる全方位分光画像計測とIBLへの応用、画像電子学会誌、Vol. 42, No.4, pp.466-476, 2013.
- [7] F. Schmitt, H. Brettel and J. Y. Hardeberg: Multispectral imaging development at ENST, Proc.of International Symposium of Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archive, pp. 50-57, 1999.
- [8] J. Cohen: Dependency of the spectral reflectance curves of the Munsell color chips Psychonomical Science, Vol. 1, pp.369-370, 1964.
- [9] L. T. Maloney: Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters, J. of Optical Society of America A, Vol. 10, pp.1673-1683, 1986.
- [10] M. J. Vrhel, R. Gershon and L. S. Iwan: Measurement and analysis of object reflectance spectra, Color Research and Application., Vol.19, pp.4-9, 1994.

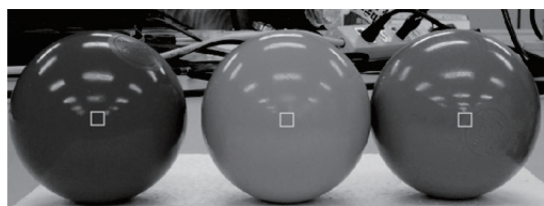
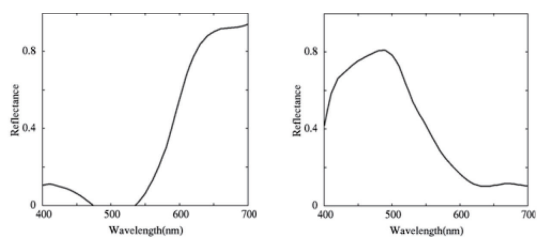


図3. 計測対象物体と分光反射率の計測部位



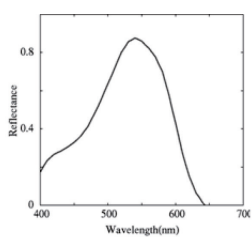
図4. F-06E スマートフォンで撮影した画像





(a) 赤色の球

(b) 青色の球



(c) 緑色の球

図5. 分光反射率の推定結果

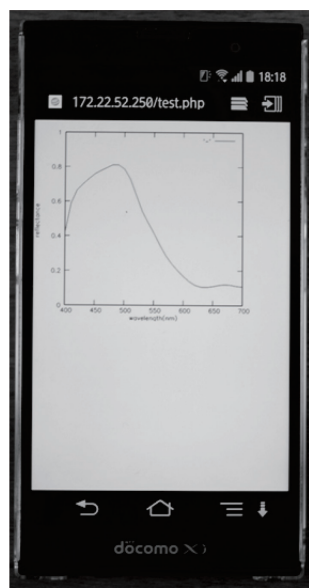


図7. スマートフォンに搭載されたブラウザから分光反射率を確認している様子

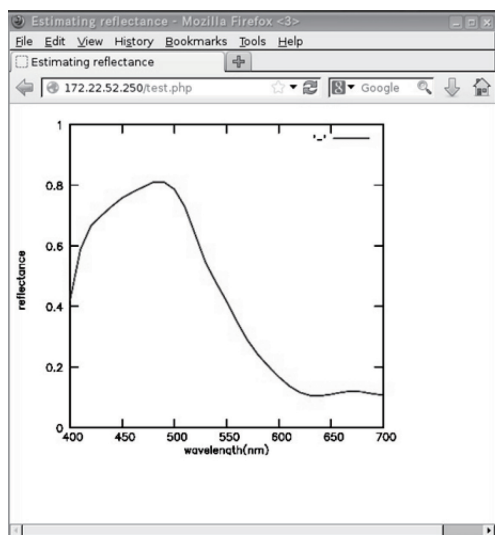


図6. PC に搭載されたブラウザから分光反射率を確認している様子