
拡散反射光の偏光特性による用紙銘柄判別

Method for Identifying Media Using Polarization State of Diffuse Reflection

星 文和*
Fumikazu HOSHI

大場 義浩*
Yoshihiro OBA

後藤 一磨*
Kazuma GOTO

三坂 好央*
Yoshihiro MISAKA

佐藤 慎司*
Shinji SATO

要 旨

プロダクションプリンターにおいて高品質な画像形成を得るために、電子写真方式では個々の印刷用紙銘柄に対して適切な印刷条件を設定する必要がある。非破壊かつ簡便な方法で用紙銘柄を判別するために、我々は光学的な手法の開発を試みており、拡散反射光の偏光特性を考慮した独自の反射モデルを提案した。

独自の反射モデルに基づいた光学系の設計においては、拡散反射光の偏光変化成分を検出することに加え、検出方向を変えることで表面多重拡散反射と内部拡散反射を区別する手法を見出し、有効性を確認した。設計した光学系を用いて商用印刷市場で広く使われる65種の用紙銘柄の反射光量を計測した結果、用紙銘柄ごとに異なる偏光変化が観測され、提案したモデルの妥当性を示唆する結果が得られた。

ABSTRACT

For high-quality image formation in a production printer, electrophotographic printing needs appropriate process conditions for each type of printing medium. To identify media types in a non-destructive and simple way, we are trying to develop an optical method and have proposed a unique reflection model with consideration of the polarization state of diffuse reflection.

We designed an optical measurement system based on our reflection model. Then, we confirmed that the surface multiple diffuse reflection and the internal multiple diffuse reflection can be separated by using different detecting directions in addition to detecting the polarization change of the diffuse reflected light. We measured the reflected light intensity of 65 types of media that are widely used in the production printing market. As a result, we found that the change in polarization state caused by reflection differs depending on the type of medium, and the validity of our reflection model was partly verified experimentally.

* リコー未来技術研究所 光エレクトロニクス研究センター
Opto-electronics R&D Center, Ricoh Institute of Future Technology

本稿は、日本画像学会に帰属の著作権の利用許諾を受け、Proceedings of the 1st International Conference on Advanced Imaging (2015) に掲載した論文を基に作成した。

1. 背景と目的

商用印刷市場では、印刷物の多品種・小ロット化に対応し、低コストで印刷可能な電子写真方式によるオンデマンド印刷へのニーズが拡大しており、オフセット印刷と同様の幅広い種類の用紙対応力が求められている。

リコーのプロダクションプリンターは統合用紙設定システムを備えており、用紙銘柄ごとに適した印刷条件が用紙データベースに登録されているため、用紙銘柄を選択するだけで簡単に定着・転写条件などが適切に設定され、高品質の画像形成を行うことができる。操作パネル上での用紙選択はオペレーターが行うが、膨大な用紙リストから目的の用紙を探し出す必要があるため用紙検索を補助するツールがあれば作業効率の向上につながる。そこで、我々は用紙銘柄を判別する光学式センサーデバイス「用紙銘柄識別リーダー タイプS3」を開発した。これにより、用紙銘柄の選択をより簡単かつ確実に行うことができるようになる。

用紙の種類を判別する光学式センサーは、非破壊を特徴としており、高速計測および低コスト化を実現できることから多くの報告例がある。一般に、用紙の表面粗さと拡散反射光の強度には相関があることが知られており¹⁾、正反射光量と拡散反射光量を利用した用紙種類判別が検討されてきた。

他にも用紙表面の画像解析や透過光量を利用した判別手法が報告されている²⁾。また、紙の透過画像に対して周波数変換を行い、そのパワースペクトルの類似度を相互相関法によって定量化する判別手法が報告されている³⁾。あるいは、用紙種類判別技術は印刷業だけに留まらず、犯罪鑑識における証拠品の異同識別への応用も検討されており、レーザー変位計による画像解析手法などが報告されている⁴⁾。

しかしながら、これらの手法では商用印刷市場に流通している多種多様な用紙銘柄を個々に判別できるほどの精度はなく、特にグロスコート紙や厚紙を正しく判別することは単純な表面での反射光や透過光のみでは難しいという問題があった。

本稿では、用紙における反射光を利用する従来手法を拡張した新しい用紙銘柄判別手法のための独自の反射モデルを提案する。また、提案する反射モデルに基づいて設計した光学系を用いて、様々な種類の用紙銘柄の正反射や拡散反射の光量を評価し、特に拡散反射光の偏光特性に注目して得られた知見を報告する。

なお、偏光特性を利用した物理特性解析は古くから知られており、例えばエリプソメトリーの手法は半導体薄膜の組成解析に広く使われている⁵⁾。しかしながら、印刷用紙のような散乱体への応用例に関する報告例は少なく、偏光を利用した用紙の反射特性に関する検討が報告されてはいるが⁶⁾、本稿のように非塗工紙だけでなく塗工紙（グロスコート紙、マットコート紙）も含めて用紙銘柄を区別するという観点で報告した例はほとんどない。塗工紙は炭酸カルシウム（白色顔料）などを原料とするコート層が表面に塗布されており、非塗工紙と比較して一般に光沢度が高い。

我々は、用紙はパルプ繊維などから構成される散乱体であり、微小な傾斜面（マイクロファセット）の集合で構成されると仮定した。本稿で提案する反射モデルは、このような散乱体における反射光の偏光変化に注目している。

2. 拡散反射光の偏光特性に注目した反射モデル

2-1 散乱体表面における反射光の偏光特性

Fig. 1は散乱体表面における反射光の偏光特性を示した図であり、散乱体表面に対して直線偏光（S偏光）の光を照射した入射面を計測面としている。ここで、計測面内でのみ反射した光の場合はS偏光を保持した状態で観測される。一方、計測面に対して法線方向のベクトルを持つ反射光路を経た光の場合には観測される偏光特性は変化する。反射光の偏光特性は、入射光の偏光方向と散乱体表面に存在する微小な傾斜面（図示せず）の傾斜角に依存し、微

小さな傾斜面に入射した光は、フレネルの式に従って偏光比が変化した状態で反射する。微小な傾斜面で1回だけ反射して計測面から逸れた光は観測されないが、複数の傾斜面で多重反射されて計測面内に戻ってきた光は偏光回転成分（P偏光成分）を持って観測される。

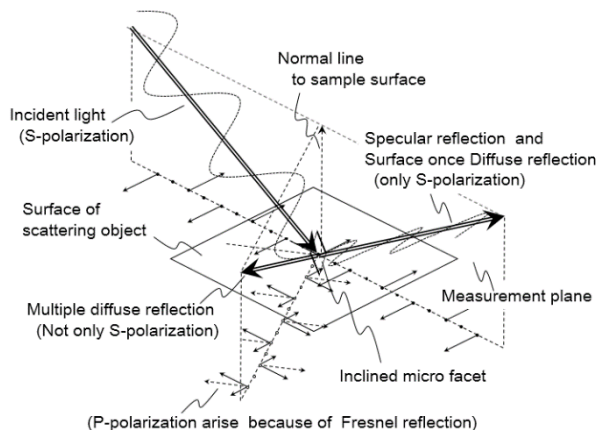


Fig. 1 Polarization state on the surface of a scattering object.

2-2 用紙における反射光の分類

我々は前述の散乱体表面における反射の考え方を、用紙に適用し、Fig. 2に示すように用紙による反射光を5種類に分類した。光の入射面（計測面）において、用紙表面で1回だけ拡散反射した光(2)と、用紙表面の凹凸や用紙内部の繊維間で多重拡散反射した光(3) (4)とでは偏光特性が異なる。これは、用紙表面で1回だけ拡散反射して計測面で観測される光の光路は計測面に対して法線方向成分を持たないが、多重拡散反射光の光路は法線方向成分を持つからである。

Fig. 2では簡単のために各光路を光線で描いているが、実際には紙繊維径より十分大きいビーム径を持つ光束を用紙に照射することを想定しているため、本稿ではマクロな拡散反射特性として反射モデルを説明する。

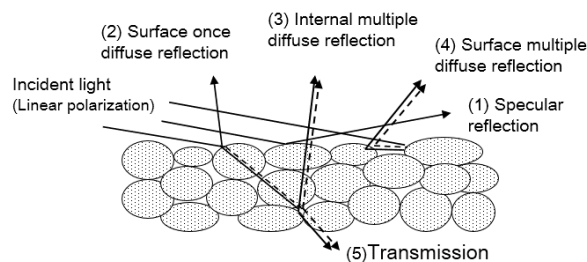


Fig. 2 Reflection types on a scattering object. Solid lines represent S-polarization and broken lines represent P-polarization.

内部拡散反射光(3)は、完全に拡散反射されることで入射方向に起因する異方性を失い、等方的に放射される。一方、表面多重拡散反射光(4)は、一部の領域では等方的な放射となり得るが、完全拡散とはならず異方性を残した状態で放射されると考えられる。そのため、これら2種類の拡散反射光は、計測面内の異なる方向で反射光量を検出することによりおおよそ分離することができる。

3. 反射モデルの妥当性検討

3-1 反射モデルに基づいた光学系レイアウトの設計

用紙のような散乱体での反射には、前述のように内部拡散反射光、表面多重拡散反射といった偏光変化を伴う反射モデルが考えられ、これらの反射光を分離して検出することができれば用紙の繊維構造などに起因する光学特性の違いをより明確に区別できると考えられる。そこで、多重拡散反射光(3)と(4)を分離して検出するのに適した検出方向を決定するために、反射光の偏光変化成分の空間的な強度分布を調べる実験を行った。

Fig. 3に、実験に使用した光学系を示す。本光学系は、光源、用紙を設置するサンプルホルダー、検出器から構成されている。光源は平行光化されたS偏光の光を射出し、用紙表面を照射する。また、一般に用紙の反射光量計測には比較的大きい入射角が

適していることから⁷⁾、光源の入射角度は 80° に設定した。検出器は偏光フィルターを備えており、入射光の偏光（S偏光）に直交するP偏光成分の光量を検出する。検出方向の仰角は 90° （用紙表面の法線方向）から 180° まで変化させた。被計測用紙には6銘柄を用意し、非塗工紙、マットコート紙、グロスコート紙の3種からそれぞれ2銘柄ずつ選定した。

Fig. 4に、本光学系を用いて観測された反射光の強度分布を示す。検出方向の仰角を 180° から 90° 方向に変化させると、いずれの用紙銘柄においても正反射角 170° 付近で急峻に光量が増加し、グロスコート紙の場合にはピークを持つ。このことは前述の偏光回転成分（P偏光成分）が計測面内においても観測されており、検出方向に依存することを意味している。その後、用紙銘柄ごとに若干の相違はあるものの 120° 付近までは緩やかに光量が増加し、 90° 付近ではほぼ一定あるいは微減となる傾向を示す。

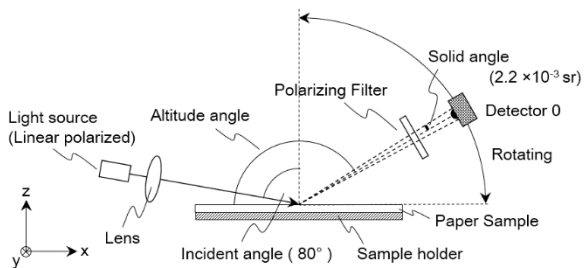


Fig. 3 Measurement system for detecting light intensity distribution.

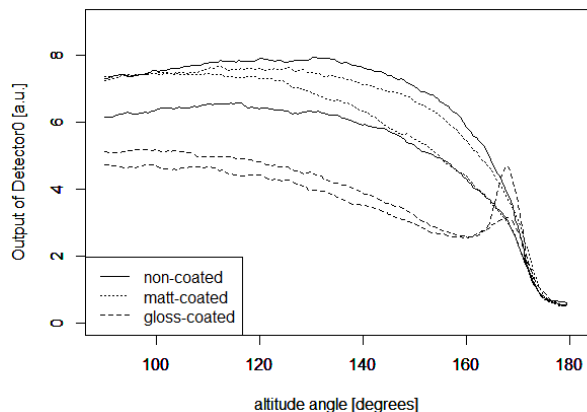


Fig. 4 Measured light intensity distribution of the 6 media.

ここで内部拡散反射光がランバートの余弦則に従う光量分布を持つと仮定すると、Fig. 4に示した光量分布から内部拡散反射光の強度分布を差し引くことでFig. 5のような強度分布が得られる。正反射の影響があまり出ない 0° から 160° の範囲の強度分布はほぼ表面多重拡散反射の光量分布と推定できる。ここでは、 90° 方向での表面多重拡散反射光の強度は0であると仮定した。Fig. 5より、表面多重拡散反射光は 150° 付近で強度が増加する傾向があることが確認できる。

Fig. 2に示したモデルの反射光(1)~(4)の計測に適した検出方向として、それぞれ 170° 、 150° 、 120° 、 90° の4つの仰角を採用することとした。ここで 170° は正反射角である。P偏光成分の光量を検出する仰角は 150° と 90° であり、それぞれ表面多重拡散反射光がほぼ最大となる角度（Fig. 5参照）と、ランバート余弦則に従うと仮定した内部拡散反射光が最大となる角度である。また、表面拡散反射光の検出に対応した仰角は、表面多重拡散反射光および内部拡散反射光の影響をできるだけ低減するため両者の間に位置する 120° とした。

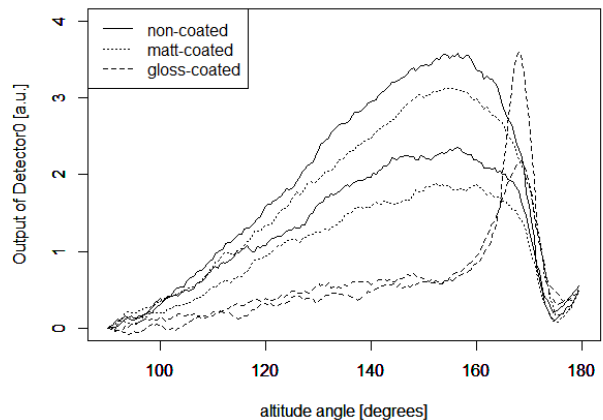


Fig. 5 Estimated light intensity distribution as surface multiple diffuse reflection.

3-2 設計した光学系による偏光変化検出の有効性確認

異なる検出方向で反射光量の偏光変化成分を検出することにより印刷用紙の銘柄を区別できる可能性を確認するために65種の様々な銘柄を用意し、Fig. 6に示す光学系により各銘柄の反射光量の計測を行った。

本光学系において、光源はFig. 3と同様に平行光化されたS偏光の光を射出し、入射角度 80° で用紙表面を照射する。各検出器の検出方向は前項で決定したように、1つの検出器 (Detector 1) が正反射角 (仰角 170°) に配置され、他の検出器 (Detectors 2, 3, 4) は拡散反射光用として仰角 150° , 120° , 90° にそれぞれ配置されている。表面多重拡散反射光および内部拡散反射光用の2つの検出器 (Detectors 2, 4) には、P偏光を透過する偏光フィルターが設置されている。被計測用紙65銘柄には商用印刷において広く使われる白紙を選択し、非塗工紙13種、マットコート紙10種、グロスコート紙42銘柄といった内訳となっている。反射光量の計測においては、用紙を平坦に保持した状態でスキャン長30 mmを一定の速度で計測し、平均値を求めた。

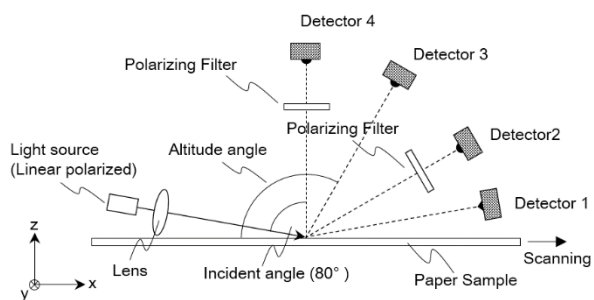


Fig. 6 Measurement system for detecting light intensity in 4 directions.

Fig. 7～Fig. 9に65銘柄の反射光量の計測結果を示す。各プロット点の形状は用紙の種類 (非塗工紙：□, マットコート紙：○, グロスコート紙：△) を表している。

Fig. 7は、偏光フィルターを備えていない2つの検出器 (Detectors 1, 3) の出力を示しており、正反射

光と拡散反射光との相関を表した従来手法に相当する結果である。両検出器の出力は高い相関を持つためパラメータの独立性としては低く、各用紙銘柄を区別しやすくするためには他の独立したパラメータを追加する必要がある。

Fig. 8では、Fig. 7のDetector 3に替わって偏光が変化した拡散反射光を検出するDetector 4の出力を縦軸に示している。偏光変化を利用したFig. 8では、Fig. 7と比較すると各用紙銘柄の計測値が分離してプロットされていることから、Detector 4の出力を用いることで各用紙銘柄をより区別しやすくなるのがわかる。なお、Detector 3, Detector 4ともに計測ばらつき (3σ) は1%以下であることを確認しており、内部拡散反射光を多く検出するDetector 4の効果は有意であるといえる。

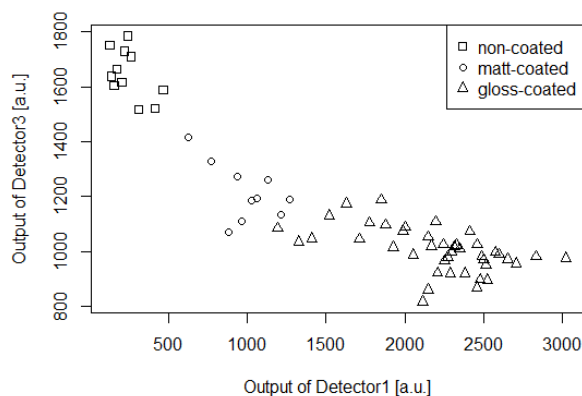


Fig. 7 Relationship between Detectors 1 and 3.

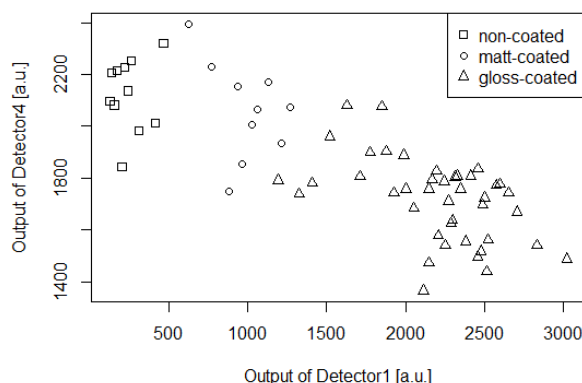


Fig. 8 Relationship between Detectors 1 and 4.

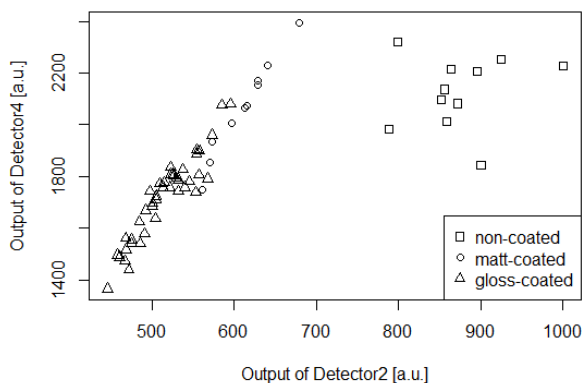


Fig. 9 Relationship between Detectors 2 and 4.

さらにFig. 9は、Fig. 8の横軸をDetector 1から表面多重拡散反射光を多く検出するDetector 2に替えて、Detector 4との出力の相関を示している。両検出器ともに偏光変化成分を検出するための偏光フィルターを備えている。まず非塗工紙に注目すると、両検出器の出力の相関はほとんどなく各用紙銘柄の計測値が明確に分離されていることがわかる。これは、紙繊維が露出した表面構造（凹凸や繊維の毛羽立ちなど）に起因する表面多重拡散反射と、用紙内部の繊維構造に起因する内部拡散反射とが、それぞれ独立した各用紙銘柄固有の値として検出されていることを示唆している。一方、塗工紙（グロスコート紙およびマットコート紙）の場合には、非塗工紙と比較してDetector 2とDetector 4の相関が大きく、各用紙銘柄の計測値が密集している部分がある。これは、コート層の存在により表面が平滑であるため、両検出器の出力において表面多重拡散反射の影響が小さく、相対的に内部拡散反射の影響が大きくなるためであると考えられる。そこで、用紙の個体ばらつきも考慮してグロスコート紙の銘柄分離性を詳細に調べる実験を行った。

Fig. 10は、グロスコート紙15銘柄をそれぞれ3サンプルずつ計測し、Fig. 9と同様にDetector 2とDetector 4の出力の相関を示した結果である。各銘柄はアルファベット記号で区別してプロットしており、サンプルの個体違いは同じ記号で表している。いずれの銘柄においても同じ銘柄であれば異なるサンプルであっても出力がほぼ一致しており、銘柄に

よっては両検出器の出力値で明確に分離できることが確認できる。すなわち、個体ばらつきや計測ばらつきは銘柄による差異と比較して十分小さく、表面多重拡散反射光用のDetector 2と内部拡散反射光用のDetector 4の出力が各用紙銘柄を区別するために有効であることがわかる。

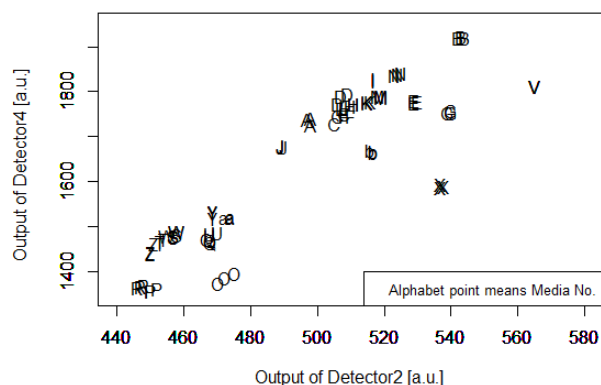


Fig. 10 Relationship between Detectors 2 and 4 for 15 types of gloss-coated media.

以上のように、Fig. 2の反射モデルに基づいて設計した光学系は、種々の用紙銘柄の偏光変化の違いを検出するのに有効であることが確認できたことから、提案した反射モデルが妥当であることが示唆される。従来、光学的手法を用いて用紙の種類を見分ける場合、正反射光や偏光を考慮しない拡散反射光によって用紙の表面性を大まかに分類する方式が一般的であったが、我々は拡散反射光の偏光変化成分を検出することで銘柄個々の違いまで区別できることを見出した。これは、用紙の繊維密度や紙厚、材料や製法などの種々の要因により用紙の光学特性が異なるためであると考えている。

4. 結論

本稿では、用紙に直線偏光の光を照射したときの拡散反射光の偏光変化に注目した新しい反射モデルを提案した。反射モデルに基づいた光学系設計では、拡散反射光の偏光変化成分を検出することに加え、検出方向（仰角）を変えることで表面多重反射と内部拡散反射を区別する手法を見出し、有効性を確認した。本提案を具現化した光学系（Fig. 6）を用いて実際に商用印刷市場で使われることの多い65種の用紙銘柄の反射光量を計測した結果、異なる検出方向で偏光変化成分を検出することにより個々の用紙銘柄が区別しやすくなる効果が確認でき、提案した反射モデルの妥当性が示唆された。

なお、本稿で提案した反射モデルを基本原理とした用紙銘柄判別技術に関しては製品化を実現しており、2014-2015年発売のRICOH Pro C7110S / C7110 / C7100S⁸⁾およびRICOH Pro C9110 / C9100⁹⁾に標準搭載されたセンサーデバイス「用紙銘柄識別リーダータイプS3」に採用されている（Fig. 11）。

■ 用紙設定を効率化する用紙銘柄識別リーダー タイプS3

印刷する用紙をセンサーで読み取ることで、用紙銘柄を自動で識別します。識別した用紙銘柄を用紙データベースから呼び出したり、給紙トレイに割り当てたりすることができ、多様な用紙をお使いになるお客様の作業効率向上につながります。

※未登録の用紙情報は識別できません。候補となる用紙銘柄が複数ある場合、正しい用紙銘柄を選択してください。



Fig. 11 Media Identification Unit TypeS3 (RICOH Pro C7100/C7100X Series Brochure).

参考文献

- 1) P. Beckmann, A. Spizzichino: The Scattering of Electromagnetic Wave from Rough Surfaces, Pergamon Press, Oxford, pp. 80-97 (1963).
- 2) M. Aoki: Image forming apparatus and image forming method, U. S. Patent 7,558,492 B2 (2009).
- 3) M. Shinozaki et al.: A Discrimination Method of Paper by Fourier Transform and Cross-Correlation (Part 2): Application to Commercial Xerography Papers, Jpn TAPPI J 55(4):514-521 (2001).
- 4) H. Miyata et al.: A Discrimination Method for Drawing Paper by Laser Displacement Sensor and Image Analysis, Jpn TAPPI J 57(5):724-731 (2003).
- 5) A. Rothen: The Ellipsometer, an Apparatus to Measure Thickness of Thin Surface Films, *Rev. Sci. Instrum*, 16, No. 2, p. 26 (1945).
- 6) S. Tanaka: Measurement of Reflection Characteristics of Paper Using Polarized Light, *OYO BUTURI*, 27(10), pp. 600-604 (1958).
- 7) ISO 8254-1:1999 (JIS P 8142:2005), Paper and board-Measurement of specular gloss-Part1:75 gloss with a converging beam.
- 8) RICOH: RICOH Pro C7110S / C7110 / C7100S, https://www.rioh.co.jp/pp/pod/pro_c/7110s_7110_7100s/ (2014).
- 9) RICOH: RICOH Pro C9110 / C9100, http://www.rioh.co.jp/pp/pod/pro_c/9110_9100/ (2015).