簡易白色板作成法の検討およびその性能評価・校正

Examination for Making Method of Reference Reflectance Panels and Validation

山下 恵*・吉村 充則**・土田 聡***

本多 嘉明****・梶原 康司****

*Megumi YAMASHITA, Mitsunori YOSHIMURA, Satoshi TUCHIDA,
Yoshiaki HONDA, Koji KAJIWARA*

Abstract: This paper describes the making method of reference reflectance panels in the case of field observation. We discussed examinations of coating materials and painting methods in order to define the making method of reference panels. As for the quality of our produced reference panel, we carried out the bidirectional reflectance factor (BRF) measurement referred to the calibrated standard panel and the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) calibration for the reference panel. The characteristic of our produced reference panel was confirmed to have almost same as the standard panel through our experiments.

1. はじめに

衛星リモートセンシングによる物理量推定や衛星センサの代替校正などにおいては、そのパラメータ取得のために地表対象物の分光反射測定が必要となる。分光反射測定には、反射係数算出の基準となる完全拡散面に限りなく近い表面構造を持つ標準白色板が求められる。これまで、標準白色板の作成やその評価に関する研究^{1,2)}はいくつかなされている。最近では、野外測定においても高い反射率を持ち方向依存性も少ないと言われる市販の標準白色板（Labsphere社のSpectralonなど）が利用されている例が見られる。しかしながら、より確からしい精度を実現する測定は、太陽条件が変化しない程度の短時間に、より多くの地

点での測定^{3,4)}が良とされており、その目的においては複数枚の標準白色板が同時に必要となる。現実には、市販されている標準白色板は、安価とは言えず、野外測定における標準白色板の準備には一考を要する。

このような背景から本報告では、1) 検定された標準白色板の代用となりうる比較的安価で均質な性能を有する白色板（本報告では簡易白色板と呼ぶ）の作成、2) その性能評価、を目的とし、簡易白色板作成法に関する検討および試作を行い、その評価を行った。性能については、検定された標準白色板を基準とした簡易白色板の二方向性反射係数（Bidirectional Reflectance Factor; BRF）を、暗室内の点光源下において光源天頂角を変化させながら測定し、検定された標準白色板の二方向性反射分布関数（Bidirectional Reflectance Distribution Function: BRDF）から簡易白色板のBRDFを求め校正し、その特性を比較し評価した。

2. 簡易白色板作成

簡易白色板の作成フローを図1に示す。

作成法は、まず、白色塗料材料・土台を検討し、塗料材料を配合する。次に、塗料を2つの塗布方法によ

* 科学技術振興事業団 CREST, JST

** 京都大学東南アジア研究センター Center for South-east Asian Studies, Kyoto University

*** 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

**** 千葉大学環境リモートセンシング研究センター
Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 40, NO. 2, 2001

図1 簡易白色板作成フローチャート

り、白色板を試作する。試作した白色板に対し、目視によって表面凹凸の有無などを確認し評価する。その評価結果によって、塗料材料の量・配合比を再検討・配合し、試作を繰り返す。最終的に、最も良質であると確認された白色板を選び、その場合の土台、塗料材料の量・配合比、塗布方法の組み合わせを作成法として確定する。

以下、フローの順に、各項目の詳細を説明する。

2.1 白色塗料の材料・土台の検討

白色塗料の材料には、比較的広い波長域において高い反射率をもつ、1) 酸化マグネシウム (MgO)、2) 高純度の硫酸バリウム (BaSO_4)、3) 塩化ナトリウム (NaCl)、4) ポリテトラフルオロエチレン (PTFE; Polytetrafluoroethylene: ‘テフロン®’で知られる。Labsphere社の‘Spectralon’はこれがベース材料である)などが適していると言われる^{5,6)}。しかし、1) MgO は、時間経過にともなう反射率変化や破損しやすいといった点で、野外での使用には不向きである。3) NaCl については、結晶粒子も大きく、また溶解方法や塗布方法を考えると‘白色板’として適していない。4) PTFEは、金属板で圧縮し用いられているが⁶⁾、加工は容易でない。これらの理由から、入手しやすく比較的加工しやすい点で、2) 高純度の硫酸バリウム (ここではKodak white reflectance standard No. 6091を使用、以下、Kodak BaSO_4 と記す)を塗料材料として

選択した。

Kodak BaSO_4 の溶解液には、合成洗濯のりの原料に使われる接着成分のポリビニールアルコール (ここでは、不純物を含まない固形 (以下PVAと記す: 99% hydrolyzed)のものを使用と、PVAを溶解するための蒸留水、塗料の乾燥を早める溶剤としてエチルアルコールの3種類を準備した。

白色板の土台は、熱や湿気に強い厚みを持った金属板やガラス板などが考えられる。加工や取扱などを考慮すると、ガラス板は適していない。ここでは、市販品の厚さ3mmのアルミ板と厚さ4mmのタイル (裏側を付着面に使う)の2種類を用意した。また、塗料を付着しやすくするために、両者共に目の粗いヤスリで表面を研磨した。

2.2 塗料材料・溶解液の配合

準備した塗料材料と溶解液の配合手順について説明する。

- 1) 接着成分であるPVAと蒸留水をビーカーに入れ、図2に示すようにホットスターラーを約60-80℃に温度設定し、3、4時間程度加熱攪拌を続け、PVA溶液を作成する。このとき、水分の蒸発を防ぐため、ビーカーにラップをかけ中心部を凹ましておく。完全に溶けたらろ過する。
- 2) Kodak BaSO_4 は微粒子で塊になっていることがあるため、混ざりやすいように細かく砕き、それとエチルアルコールを少量ずつ大きめのビーカーに加え、ガラス棒もしくはさじで混ぜ合わせる。
- 3) 2)のKodak BaSO_4 とエチルアルコールを混ぜ

図2 ホットスターラーとPVA溶液作成風景

たものに、1)で作成したPVA 溶液を加え、1)と同様にホットスターラーの温度を最初は100℃、少しずつ下げて50-60℃に設定し、加熱しながらめらかになるまで攪拌を続ける。このときも、ピーカーにはラップをして水分とアルコールの蒸発を防ぐ。

2.3 塗料塗布方法

塗布は、以下に記す2つの方法で行った。

- 方法1．エアコンプレッサとスプレーガンを用い、作成した白色塗料を土台（アルミ板、タイル）へ均一に吹き付ける。（以下、スプレー式と記す）
- 方法2．白色塗料を、土台（アルミ板、タイル）に直接ヘラなどで塗り付け、バットなどの容器に入れてふたをし、十分に乾燥固化させる。その後、耐水性ヤスリ（＃240, 300, 400, 600, 800）を平らなアルミ板（白色板土台と同程度のサイズ）に巻き付けて、粗いものから細かいものに順に変えて、表面の凹凸を見ながら削り、均質にしていく。（以下、乾燥固化研磨式と記す）

2.4 試作・目視評価

白色板の試作は、2種類の土台(アルミ板、タイル)に対し2つの方法（スプレー式、乾燥固化研磨式）で塗布して行った。試作した白色板は、1)アルミ板・スプレー式、2)タイル・スプレー式、3)アルミ板・乾燥固化研磨式、4)タイル・乾燥固化研磨式の合計4種類である。それぞれに対する目視評価を、表面凹凸の有無、塗料の塗布斑の有無、塗料粘着性や乾燥具合から行った。

2.5 簡易白色板作成法の確定

試作した白色板4種類の目視評価結果について以下にまとめる。

- 1)アルミ板・スプレー式、および2)タイル板・スプレー式については、塗料の粘着性はアルミ板とタイ

ル共に変わらなかったが、土台面以外にも吹き付けるために塗料が無駄になったり、BaSO₄の厚みを作るのに時間を要した。吹き付け中に、ゴミと一緒に土台へ付着したり、射出しやすくするために蒸留水・エチルアルコールを途中に加えることもあった。また、スプレー中に表面に凹凸や斑ができると、修正が困難であった。スプレー式による塗布は、労力・費用ともに、あまり効率的ではなかった。3)アルミ板・乾燥固化研磨式、4)タイル・乾燥固化研磨式による試作では、特別な機材は必要とせず全作業が室内で可能だった。塗料も無駄なく使うことができた。3)によるアルミ板の土台は、4)によるタイルに比べて、塗料粘着性が低く、乾燥中にはがれ落ちたりすることもあった。乾燥固化は、自然で行い（ドライヤーを使用したところ、ひび割れたり空気中のホコリが付着した）、湿度の高い時期でも3日間程度だった。乾燥固化研磨式では、実作業時間はかからず、また特別な技術も必要としなかった。

以上のことから、4)の土台には市販のタイル裏面、塗布方法は乾燥固化研磨式の組み合わせが、最も均質な簡易白色板が作成できることが確認できた。したがって、表1に示す塗料材料・溶解液の量・配合比で、タイル裏面を土台とし、乾燥固化研磨式による塗布方法を、簡易白色板作成法として、確定した。なお、表1に示すそれぞれの量・配合比で、10cm 四方の簡易白色板が6枚作成でき、1枚当たりの材料費は、2500円程度であった。

3．簡易白色板の性能評価

簡易白色板の性能は、簡易白色板自身の持つ二方向性反射分布関数（以下、BRDF と記す）特性を、検定された標準白色板（Labsphere 社製 Spectralon）と、比較用に同 Labsphere 社のロットの違う Spectralon（以降、比較用白色板と記す）の BRDF 特性と比較することによって評価することにした。なお、この検定さ

表1 10cm 四方の白色板 6 枚分の塗料材料・溶解液の量および配合比

塗料材料・溶解液	重量 (g)	配合比(%)
Kodak White reflectance standard (BaSO ₄)	90	42.86
Polyvinyl alcohol (PVA) 99-100% hydoloyed /蒸留水 (PVA2.5%溶液)*	70	33.33
エチルアルコール	50	23.81

*PVA2.5%溶液は、多めに作成しておくとう便利

れた標準白色板は、センサ角を 0° 、光源天頂角を $10\text{--}85^\circ$ の 5° 間隔で反射係数絶対値を測定し、BRDF が求められたものである。

性能評価のために、まず、室内計測設備のもとで、検定された標準白色板を基準とし、センサ角を 0° に固定し、光源天頂角 θ を変化させながら、被測定対象とする簡易白色板と比較用白色板の分光反射強度を測定し、標準白色板に対する簡易白色板と比較用白色板の二方向性反射係数（以下、BRF と記す）を算出した。次に、算出した BRF を用い、検定された標準白色板の BRDF から、簡易白色板と比較用白色板の BRDF を求めた。

3.1 BRF 測定

BRF 測定は、標準電球（ウシオ電機社製、分光放射照度標準電球）が備わった簡易小型暗室ケース内で実施した。分光放射計には、Field Spec FR (Analytical Spectral Devices 社) を用い、センサ視野角は 8° とし、波長範囲を可視近赤外域（ $400\text{--}1000\text{nm}$ ）とした。

測定は、図 3 に示す要領で行った。光源 (Source) である標準電球は固定し Sensor と Panel のなす角度が 90° になるように、光源天頂角 θ が $\theta=15^\circ$ (図中灰色の Sensor, Panel) から 75° (図中白色の Sensor, Panel) までを 5° 間隔の角度で Panel と Sensor を移動する。

図3 光源天頂角変化による BRF 測定模式図

光源天頂角 θ 毎に、標準白色板、簡易白色板、比較用白色板、の順に置き換えながらそれぞれの分光反射強度を測定する。標準白色板に対する被測定対象白色板の反射係数は、式(1)によって求められる。

$$R'smp(0/\theta) = DNsm(0/\theta) / DNstd(0/\theta) \quad (1)$$

ここで、

0 : センサ角 (nadir)

θ : 光源天頂角 ($15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75^\circ$)

$R'smp(0/\theta)$: θ のときの標準白色板に対する被測定対象白色板の反射係数

$DNsm(0/\theta)$: θ のときの被測定対象白色板の放射計デジタルカウント値

$DNstd(0/\theta)$: θ のときの標準白色板の放射計デジタルカウント値

式(1)から、天頂角 θ 毎の標準白色板に対する簡易白色板および比較用白色板の BRF をそれぞれ算出した。

3.2 BRDF 校正

一般に BRDF は、ある光源方向 (ϕ, θ) から照射する放射照度 $dE(\phi, \theta)$ に対する測定対象物からセンサ方向 (ϕ', θ') への放射輝度 $dL(\phi', \theta')$ の比で表され、式(2)となる。

$$F(\phi, \theta; \phi', \theta') = dL(\phi', \theta') / dE(\phi, \theta) \quad (2)$$

ここで、

$F(\phi, \theta; \phi', \theta')$: 対象物の BRDF

ϕ, θ : 光源の方位, 天頂角

ϕ', θ' : センサの方位, 角度

測定において基準に用いた標準白色板の BRDF は、アリゾナ大学の専用測定施設において、センサ角を 0° に固定し、天頂角 10° から 85° までの 5° 間隔毎に、 $450\text{--}2400\text{nm}$ の波長範囲で 18 波長帯の反射係数絶対値が値付けされている。

したがって、センサ角を 0° 、光源方位 ϕ を固定し、天頂角 θ を変化させて測定した場合、センサ方向 (ϕ', θ') および光源方向 ϕ は定数となる。被測定対象白色板の BRDF は、値付けられた標準白色板の BRDF を用いれば、式(3)から求められる。

$$Fsm(\theta) = R'smp(0/\theta) \times Fstd(\theta) \quad (3)$$

ここで、

$Fsm(\theta)$: θ を変数とする被測定対象白色板の BRDF

$F_{std}(\theta)$: θ を変数とする標準白色板の BRDF (既知)

BRF 測定は400-1000nmを対象としたので、標準白色板の値付けられた18波長帯から、可視近赤外域455, 502, 554, 647, 699, 757, 860, 948nmを中心とする ± 5 nmの8波長帯それぞれについて、天頂角 θ 変化による簡易白色板および比較用白色板のBRDFを式(3)より求めた。

3.3 BRDF 特性比較

図4に、式(3)で算出した簡易白色板および比較用白色板の可視近赤外域の8波長帯における天頂角 θ 変

図4 比較用白色板(上)と簡易白色板(下)の可視近赤外域におけるBRDF

化のBRDFを示す。両者が完全拡散面と仮定すると、 θ 変化による波長別の反射係数はすべて1で一定し、グラフは平面となる。比較用白色板に用いた、反射率が高く方向依存の少ないと言われる Spectralon にも、固有のBRDF特性があることがわかる。また、簡易白色板BRDFの方向依存および波長依存性は、少ないことがわかる。

図5 a, b, cは、可視域554nm, 699nm, 近赤外域860nmの3波長帯における天頂角 θ 変化の標準白色板, 簡易白色板および比較用白色板のBRDFである。図中のポイント▲, ●, ■は、それぞれ標準白色板,

図5 554nm, 699nm, 860nmにおける天頂角変化の標準白色板(▲), 簡易白色板(●), 比較用白色板(■)の反射係数絶対値と4次近似したBRDF (上から順に, a; 554nm, b; 699nm, c; 860nm)

簡易白色板，比較用白色板の反射係数絶対値を示し，グラフ上のラインは，それぞれの反射係数絶対値を4次式で近似した¹⁾BRDFである。これらの近似式を用いれば，任意の天頂角 θ で測定した対象物の反射係数の絶対値を求めることができる。また，簡易白色板のBRDF曲線は，標準白色板と比較用白色板のそれとを比較すると，グラフa, b, cともによく似た曲線（上に凸）をし，また両者の間に位置している。つまり，検定された標準白色板と，そのロットの異なる比較用白色板にも両者の差が見られるが，簡易白色板はその差の間に位置し，十分な性能を有していると言える。

なお，Jackson(1992)¹⁾が行った，Spectralonと彼等が作成したBaSO₄白色板に対する同様の測定結果によると，4次式で近似したBaSO₄白色板のBRDFは，Spectralonのそれと異なった曲線（下に凸）または直線に近い曲線を示しばらつきも見られ，反射係数も全体的に低かった。それらの要因は，BaSO₄の塗布方法に依存すると彼等は指摘している。

これらの結果，乾燥固化研磨式によって筆者らが作成した簡易白色板の性能は，検定された標準白色板とその比較用白色板と同等のBRDF特性をもち，野外での分光放射測定に‘標準白色板’に用いるものとして，評価できる。

4. ま と め

本報告では，比較的安価で検定された標準白色板と同等の性能を有する簡易白色板作成法を検討し，その評価とBRDF校正を行った。以下に，作成法および性能評価をまとめる。

- ・白色板土台には，加工に手間のかからない市販のタイルなどを用いるとよい。
- ・硫酸バリウムの塗料塗布法は，スプレーによる塗布よりも，土台に塗り付けて乾燥固化させ，耐水性やスリで研磨するほうが，効率的に十分な厚みを持った白色板が作成できる。
- ・提案する作成法によれば，白色板表面が汚れたり傷がついても，その上から新しい塗料を塗ることによって再利用が可能である。
- ・簡易白色板は，天頂角変化による反射係数の大きな低下やばらつきは少なく，一般に分光放射測定において標準とされているSpectralonのBRDFと同等の特性をもつ。

以上のことから，作成した簡易白色板は，筆者らの想定する野外分光放射測定において標準白色板として充分適用できるものと結論できる。

最後に，太陽天頂角変化を考慮した野外分光放射測定を行う際には，白色板のBRDF測定を同時に行うことが望ましい。その測定方法に関しては，参考文献6)，7)，8)を参照されたい。

なお本報告は，科学技術振興事業団(JST)戦略的基礎研究推進事業部(CREST)「地球変動のメカニズム」研究領域にける『熱帯林の林冠における生態圏-気圏相互作用のメカニズムの解明』で得られた成果の一部である。

謝辞

簡易白色板作成を進めるにあたり，白色板の塗料材料の検討においては，科学技術振興事業団の山本浩万氏，千葉大環境リモートセンシング研究センターの近田朝子氏に，多大な協力と助言を戴いた。また，白色塗料の塗布方法については，木村凱昭氏および，秀光電機株式会社須佐泰隆氏に，貴重なご意見を戴いた。ここに記して感謝を表す。

(受付日2000.11.6，受理日2001.3.14)

参考文献

- 1) Ray D. Jackson., et al.: Bidirectional Calibration Results for 11 Spectralon and 16 BaSO₄ Reference Reflectance Panels, Remote Sensing Env., Vol. 40, pp. 231-239, 1992.
- 2) 古賀，石山，梶原，本多：標準白色板の反射特性評価，平成8年度日本写真測量学会年次学術講演会論文集，pp. 63-64，1996.
- 3) 梶原，本多，木村，須佐：野外用分光反射率観測システムに関する研究，平成7年度日本写真測量学会秋季学術講演会論文集，pp. 237-240，1995.
- 4) 吉村，山下，野村，中静：熱帯林・林冠観測クレーンをプラットフォームとする三次元・分光計測システムの開発とその運用，平成12年度日本写真測量学会秋季学術講演会論文集，pp. 127-130，2000.
- 5) 江森康文，安田嘉純：フィールドにおける分光放射測定，キャノニメージ編 REMOTE SENSING，pp. 297-316，1969.
- 6) Ray D. Jackson, M. Susan Moran, et al.: Field Calibration of Reference Reflectance Panels,

- Remote Sensing Env., Vol. 22, pp. 145-158, 1987.
- 7) Elizabeth A. Walter-Shea, Ray D. Jackson, et al.: An Improved Goniometer System for Calibrating Field Reference-Reflectance Panels, Remote Sensing Env., Vol. 43, pp. 131-138, 1993.
- 8) 土田, 佐藤, 岡田: 空間不均一性を考慮した地表面 BRDF 測定システム—スペクトロラジオメータ・デジタルカメラの併用—, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 19, No. 4, pp. 49-59, 1999.

コンピュータプログラム販売の御案内

日本写真測量学会では次のプログラムの販売を行っています。御希望の方は事務局 (Tel 03-3984-7040, Fax 03-3984-7402) まで御問合せ下さい。

(賛助会員価額, 消費税別)

1. バンドル法空中三角測量 (汎用計算機用)	120万円
2. 同上 (パソコン用)	60万円
3. PG MAN (一般カメラによる三次元座標計測)	50万円
4. BIRD MAN (PG MAN にステレオ視機能を付加)	60万円
5. SPOT DTM (SPOT ステレオ画像からの DTM 自動作成)	150万円