

# フラットフィールド補正用野外積分球の製作と活用

佐伯和人<sup>1</sup>, 坪井直<sup>2</sup>, 林宏昭<sup>2</sup>

## 1. フラットフィールドの必要性と本研究の目的

天文用冷却CCDカメラの普及によって、アマチュア機材でも高度な天体観測が行えるようになってきた[1]。また、天体観測のみならず、地球観測リモートセンシングのグランドトゥルス測定にも冷却CCDカメラを使用する研究例が増えている。冷却CCDカメラを用いた観測の精度を大きく左右するのがフラットフィールド補正である。フラットフィールド補正とは、均一な明るさを持つ面を撮影したフラットフィールド画像を用いて、光学系の周辺減光、光学系に付着したゴミの影響、CCD各画素の画素間感度偏差、等を補正する作業である。

本研究の目的は、アマチュアから研究用まで幅広く使用できるフラットフィールド取得用野外積分球を開発し、その製作ノウハウと、性能の評価方法を提案する事である。安価に工作できる機材でありながら、冷却CCD取得画像を大幅に改善できるものである。多くの潜在需要があると考えている。本研究で用いている冷却CCDカメラはムトーエンタープライズ製のCV04II (40万画素) であり、観測対象は月面であるが、他社の冷却CCDカメラ用や他の観測目的用の野外積分球を製作する際も同じノウハウを活かせるようデータの解釈法を詳しく書くよう試みた。

積分球とは、中空の球の内壁に硫酸バリウム等を塗布して拡散反射するようにし、内部で点灯させた

光源の光を完全拡散光にして開口部より放射するものである。本来の積分球は計測器の絶対感度校正に使用されるものなので、輝度が厳密に調整できる光源や測定系が附属していたり、光学的な性能をより高精度な測定器によって記載されている。大変高価なものであり、定期的な輝度校正も必要なため、光学機器を開発しているような一部の施設にしかなく、もちろん野外に気軽に持ち出せるようなものではない。本研究の積分球は、良好なフラットフィールドを得ることのみに目的を絞り、安価で簡単に製作可能で、また野外にも気軽に持ち出せる事を目標に製作した。完成した野外積分球を図1に示す。図1(a)は、積分球を使用して天体望遠鏡CCDカメラのフラットフィールドを撮影している様子である。(b)は積分球の開口側の半球である。光源となる電球が5箇所に

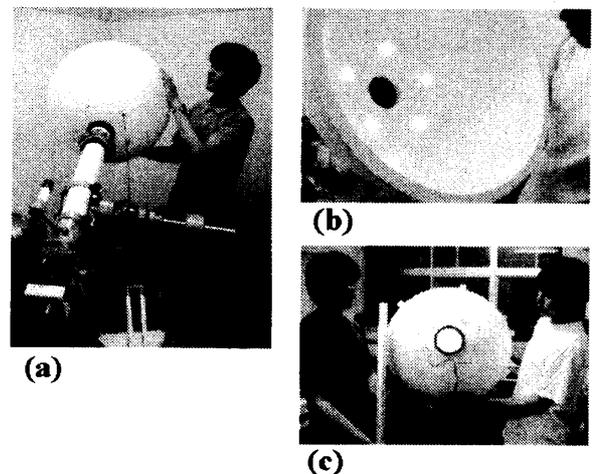


図1：野外積分球 (a) フラットフィールド撮影中の様子、(b) 積分球の開口部と光源を持つ側の半球内部、(c) 点灯中の開口部

1 秋田大学工学資源学部附属素材資源システム研究施設

2 秋田大学鉱山学部資源素材工学科

埋め込まれている。(c)は点灯した状態の積分球の開  
口部を撮影したものである。

## 2. フラットフィールド補正の概要

フラットフィールド補正の作業過程を解説する。図

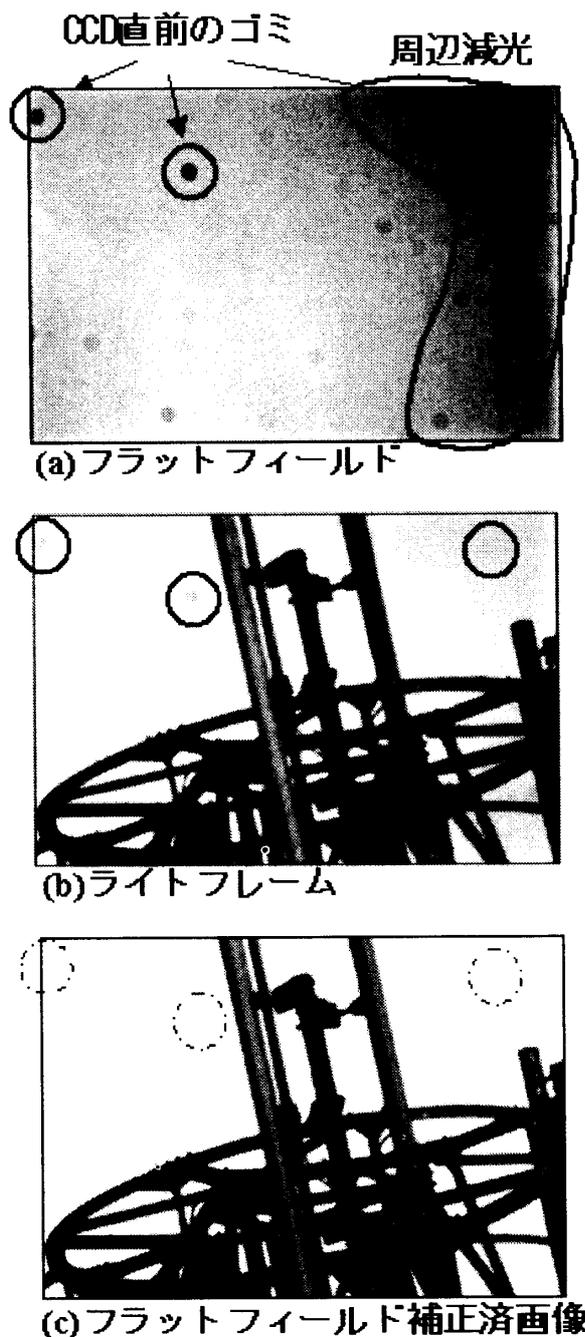


図2: (a) フラットフィールド, (b) 天体望遠鏡で500m程  
離れた携帯電話基地局のアンテナを撮影したライトフレ  
ーム, (c) フラットフィールド補正済の画像

2 (a)は図1 (a) のようにして撮影したフラットフィー  
ルドである。図2 (b)はフラットフィールド補正をす  
る前の画像である。それぞれの画像は補正の効果が  
良くわかるようにコントラストを調整してある。図2  
(a) (b)の右端全体が暗いのは、周辺減光効果である。  
周辺減光の原因は、光軸に平行に入ってくる光の量  
に比べて光軸に斜めに入射する光の量が少ない事  
(コサイン4乗則)、絞りによるケラレが画像周辺部ほ  
ど大きい事(口径食)による。同じレンズであれば、  
絞りを絞り込むほど改善する。円形の黒い染みは、  
CCDの直前についている保護ガラス上のゴミであ  
る。フラットフィールド補正はフラットフィールド画  
像を用いて、次式で行う。

$$I = LF \times \left( \frac{Ave}{FF} \right)$$

ここで、 $I$ は補正済画像、 $LF$ はライトフレーム画像  
(対象物を撮影した生画像)、 $FF$ はフラットフィー  
ルド画像、 $Ave$ はフラットフィールドの画像( $FF$ )の平均  
輝度値である。ただし、 $LF, FF$ はダークフレーム補正  
(暗電流補正)を完了している。ダークフレーム補正  
とは、光学系に光を入れない状態で、補正したい画  
像の露光時間と同じ積分時間で取得したダークフレ  
ーム画像を、撮影した画像から減算する補正である。

フラットフィールドは、天文台ではドームの内側に  
白い幕などをはり、できる限り均一な明るさになる  
ように照明したものを撮影したり(ドームフラット)、  
薄明時もしくは日中の空を撮影したり(スカイフラッ  
ト)する[1]。ドームを持たないアマチュア天文家の  
多くは、対物レンズに光を拡散させる乳白色アクリ  
ル板などをかぶせ、薄明時や日中の青空を用いてス  
カイフラットを撮影している[2]。

著者らは、アマチュア天文機材を用いた月面分光  
観測[3]を行っている。この観測ではスカイフラット  
が使えない以下のような事情があった。(1)バンドパ  
スフィルターを差し替えて観測するため、スカイフ  
ラット撮影時とゴミの位置やフィルター位置が一致

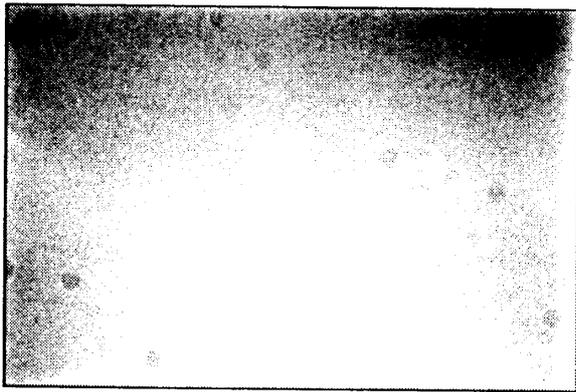


図3：シャッターの影が写ったフラットフィールド。650nmのバンドパスフィルターを用いて、露光時間0.1秒で撮影。

しているとは限らない。(2) バンドパスフィルターの波長によってフォーカス調整をしなくてはならないが、同じフォーカス位置を日中に再現する事が困難である。(3) 露光時間を月面撮影時と同じにすると、スカイフラットは明るすぎて、飽和してしまう。等があげられる。フラットフィールドは露光時間に関係なく使用できると解説された文献も多いが、それは撮像装置の方式と露光時間による。CCDカメラが機械シャッター式で、かつ露光時間がシャッター開閉速度に迫るほど高速な場合は、シャッターの影が画像に写るので露光時間を合わせなくてはならない。図3は野外積分球をかぶせて高速シャッター(0.1秒)で撮影したフラットフィールド画像である。画面いっぱい星のようなやや明るい模様がある。これは、5枚のシャッター板が開いていく際、その移動によって露光時間が長い部分と短い部分の差が生じている。シャッター開閉時間に比べて露出時間が十分に長い場合は問題ないが、露光時間が短い場合は、観測対象の露光時間とフラットフィールドの露光時間をあわせる事でシャッターの影響を取り除く必要がある。また、フラットフィールドの輝度でもできる限りカメラの有効最大輝度付近に達するように光源の明るさを調整した方がよい。データ転送の際に混入するノイズの大きさは一定レベルなので、フラットフィールド画像の輝度が高い程、ノイズ成分の

影響の割合が少なくなるからである。以上の事から、フラットフィールドの輝度は、観測対象の輝度に近いと都合がいいという事になる。

野外積分球によるフラットフィールド画像の取得は、スカイフラットに比べて、メリットが多い。第一に、夜間の撮影ができる。スカイフラットを撮影するために日中にわざわざ観測する必要がなくなる。第二に、フラットフィールドの輝度を制御できる。観測対象物の明るさにあわせて設計して対象観測とフラット取得の露光時間がほぼ同じになるようにしておけば、運用が簡便となる。第三に、観測条件に応じて、その場で対応できる。観測の際に露光時間を変更したり、フィルターやフォーカスに変更が生じた場合も、その場でフラットフィールドを取得して対応できるわけである。

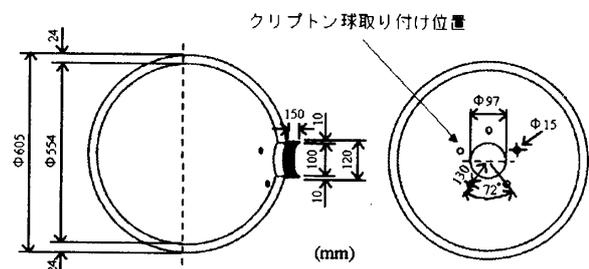


図4：野外積分球の設計図

表1 野外積分球材料リスト

品目	規格	個数
発泡スチロール半球	直径60cm	2個
クリプトン球	2.5V仕様	5個
豆電球用ソケット		5個
白色塗料	アサヒペン クリエティブカラー マットホワイトスプレー	4~5本
自動車用12Vバッテリー		1個
ワニ口クリップ	大(自動車バッテリー用)	2個
その他に接着剤、配線用コード、熱収縮チューブ、ダンボール紙など		

### 3. 野外積分球の製作

積分球の構造を図4に、材料を表1に示す。製作費のほとんどは、発泡スチロール球殻代と塗料代であり、本研究で製作した積分球の製作費は約2万円である。また、製作日数は一人で作業する場合、二日間から三日間ほどである。発泡スチロールの球殻はホームセンター等で手に入る。複数のメーカーが生産しているが、著者らが知る限りの既製品の最大直径は90cmである。性能を決定する要因は、開口部の大きさ、電球の取り付け位置、内壁の処理、である。開口部の大きさは積分球の直径に比べて小さい程良い。一般的には開口部の直径は積分球の直径の3分の1以下が良いとされている[4]。それ以上の開口部直径となる場合は、多重反射の効果が減る事を考慮して、電球の数を増やしたり、その配置を工夫して、電球からの直射光でも開口部と対称な位置の内面が、可能な限りムラなく照明されるように調整する必要がある。

#### 3.1 塗料の選択

内壁は、平滑度が高く、拡散反射をし、かつ反射率の高い塗料で塗られている必要がある。市販の積分球は広い波長範囲で拡散反射特性のよい、硫酸バリウムやスペクトラロンという特殊な塗料が塗られている[4]。特殊な塗料を用いて作ったのでは、野外積分球を普及させる事が困難になる。そこで、市販の

表2 塗料リスト

記号	*製造元	製品名
AN	1	水性ニュースプレー白
AC	1	クリエイティブカラーズプレーマットホワイト
AP	1	カラーパレット水性塗料マットホワイト
AM	1	マーキングスプレー白
NS	2	水性スマイルツヤなし
NE	2	水性エナメルミニホワイト

\*製造元 1:株式会社アサヒペン  
2:ニッペホームプロダクツ株式会社

塗料の光学的性質を測定した。ツヤあり系の塗料は拡散反射性能が悪い事が予想されるので、市販の白色塗料の中からツヤ消し系を中心に発泡スチロールに使用できる物5品目を購入した。また、確認のためにつやあり白色塗料も1品目購入した。測定した塗料と、その略号を表2に示した。測定にはオプトリサーチ社の分光放射計MSR-7000を用いた。MSR-7000は回折格子を使った分光器で、受光部に入射した光を光ファイバーで本体に導入し、280nmから2500nmまでの範囲で輝度を測定できる。観測する方向の角度を変えて塗料の反射率を測定できるようにするために、測定台を製作した(図5)。光源にはニコン製の顕微鏡用ファイバーハロゲンライトを用い、入射角30度で試料に入射するように光ファイバーを固定した。分光放射計の受光部は可動アームに取り付けてあり、観測角を変えて測定する事ができる。入射角とは試料平面の垂線と、被観測点-光源ラインのなす角度であり、観測角とは試料平面の垂線と、被観測点-観測機器ラインのなす角度である。また、被観測点-光源ラインと被観測点-観測機器ラインのなす角度を位相角と呼ぶ。塗料の反射率の位相角依存性を調べるため、各塗料を塗布した発泡スチロール板を位相角30度、60度、90度の3通り測定した。測定波長

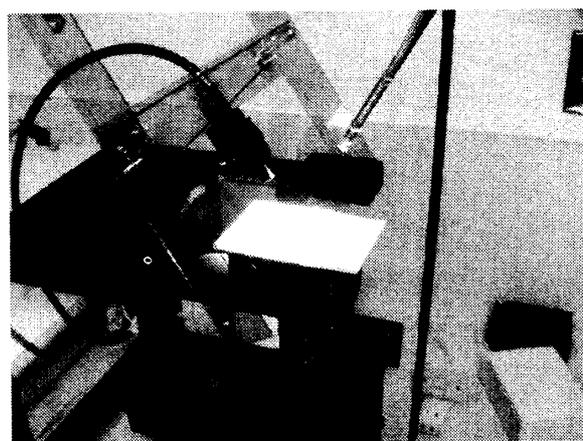


図5: 反射率角度依存性測定用の測定台。左側の黒いファイバーはMSR-7000の受光部。右側の銀のファイバーはハロゲン光源の光を導いている。光源側は入射角30度に固定。受光部は観測角0-80度で可変。試料台に載せた試験板のサイズは13cm x 9cm。

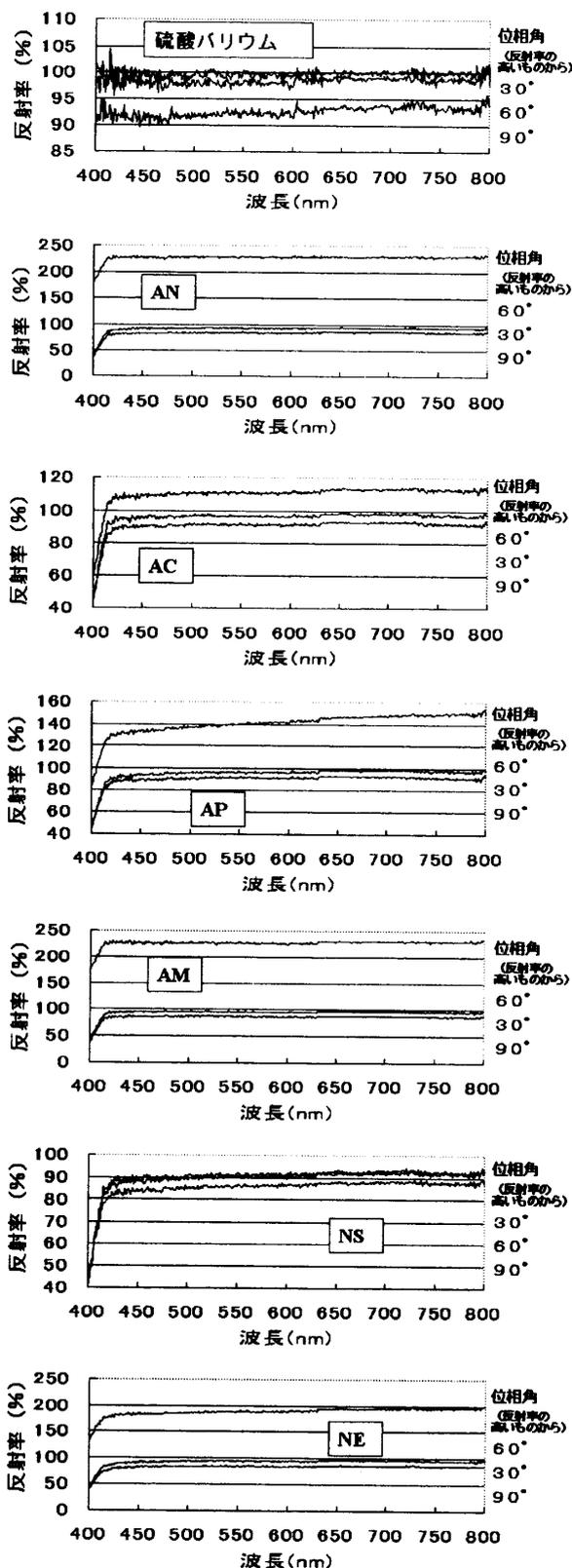


図6：硫酸バリウムと各塗料の分光反射率位相角依存性測定結果。各反射率は硫酸バリウムの位相角30度の輝度を100%として規格化してある。図中の塗料略号の詳細は表2参照。

範囲は400-800nmである。MSR-7000は2500nmまで測定可能であるが、光源の光ファイバーが800nm以上の波長を透過しない特性であったため、この範囲での測定とした。

測定結果を図6に示す。全ての反射率は標準反射板である硫酸バリウム板の位相角30度の輝度を100%として規格化している。ただし硫酸バリウムの位相角30度のデータは、標準データと全く同じ条件であらためて測定したものである。したがって硫酸バリウムの位相角30度データの100%からのズレは電気的なノイズ成分と考えられる。400nm付近でノイズ量が増えるのは、光源のファイバーからの光量がこの波長付近で減少している事を示唆している。硫酸バリウムは標準反射板として使用されるだけあって、位相角による反射率の変化がほとんどなく、90%から100%の間におさまっている。ツヤありの塗料であるANは鏡面反射をする角度(位相角60度)で、他の位相角時の2倍以上の反射がある。ツヤ消しと明記されたAPも意外と位相角による反射率の変化が激しい。AMはツヤに関して表記はなかったが、データを見ると完全にツヤあり塗料である事がわかる。NSは位相角による反射率の変化がほとんどない点は優れているが、反射率そのものが、90%前後とやや悪い。最終的に反射率が高く、位相角依存性も比較的少ないACを採用した。全ての塗料に関して、400nm付近では反射率が低下している。この事から、この積分球は紫外光に関しては十分な性能を発揮しないと予想される。

ところで、これらの塗料を塗った発泡スチロール板に光を当てて肉眼で観察した際、人間の眼でも驚く程性質が見分けられる事がわかった。光にかざした時にテカテカ光らず、またもっとも明るい白に見える板を選ぶと、今回測定して選んだものと一致した。測定装置がない場合で、可視光の波長域でのみ使用する場合は、肉眼でツヤ消し系塗料を何種類か比較すれば、おそらく十分であろう。ただし、どのよ

うな塗料を用いた場合も、次章の性能のチェックをして製作した積分球の精度を知っておく事が重要である。

積分球内壁を600-800番のサンドペーパーで平滑化した後、1000番で表面を整え、塗料ACを2度塗りして積分球を内壁を仕上げた。積分球の開口部には、円筒形のアダプターをダンボール紙で工作し、天体望遠鏡の対物レンズフードにぴったりと被せる事ができるようにした。

我々は夜間にしか観測を行わないので、積分球の外から発泡スチロール層を透過してくる光についての防護はしていない。しかし、まわりが明るい環境で使う可能性がある場合は、積分球の外壁を反射率の高い白塗料で厚塗りした後、さらにその上につや消しの黒で重ね塗りしておくとうまく安心であろう。

### 3.2 光源の選択

電球はハロゲン球、クリプトン球などの白熱電球を使う。色温度は多くのハロゲン球は3000K前後、クリプトン球は2800K前後であり、晴天青空光の10000Kに比べると低いが、特に問題はない。蛍光灯などの高速で明滅している光源は不適切である。また、同様に白熱電球であっても、交流電源で使用したり、リップルののった電源を使用すると輝度が周期的に変化するので、短時間露出撮影には不適切である。電源は野外での使用や、短期的な電圧の安定性を考えると、電池が最適であろう。本研究で製作した積分球は自動車用の12Vバッテリーを使用できるように、2.5Vのクリプトン球を5個直列結線して光源としている。電球の取り付け位置は、開口部周辺で、かつ開口部からは絶対に見えない位置とする。電球からの直射光が開口部を照らさないように、電球は頭が積分球の内部に出るかでないかの位置に埋め込む。光量が少なくても良い場合は、電球取り付け部に乳白色アクリル板を被せて、電球からの光がそこで拡散してから照射されるようにすれば、より性能が向上す

ると期待される。前述の通り、積分球光量は観測対象に近い程便利なので、電球の種類や個数、電圧などを工夫して調整すると良い。

## 4. 性能評価

野外積分球は比較的簡単に製作できるが、その精度を確認しておかなくては実験目的には使えない。一般に積分球の性能の良し悪しは輝度の正確さと安定性にあるが、本研究の野外積分球は、輝度の時間安定性には必要ではなく、輝度の空間一様性のみが重要である。性能の評価に特殊な測定装置が必要であると、手軽な積分球の魅力が半減する。そこで、積分球製作者が持っているであろう装置のみで性能を検証する方法をここに二種類提案する。

### 4.1 スカイフラットとの比較

完成した積分球の性能を確認するために、スカイフラットとの比較を行った。月面観測に使用している天体望遠鏡(8cm屈折式望遠鏡ビクセン社GP-ED80SM)に420nmのバンドパスフィルターを装着し、乳白色アクリル板を通して青空を撮影したスカイフラットと、同じ装置で積分球フラットを撮影したものを比較した。バンドパスフィルターを用いるのは、空と電球のスペクトル形状の差の影響を排除するため

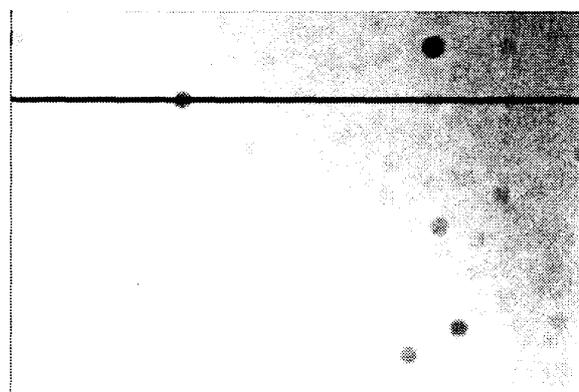


図7: 420nmのスカイフラット画像。露光時間1.6秒。本画像と420nmの積分球フラット画像(露光時間5.7秒)を比較する。肉眼では両者の画像は全く同じに見える。比較例として抽出した1ライン分の位置を黒線で示してある。

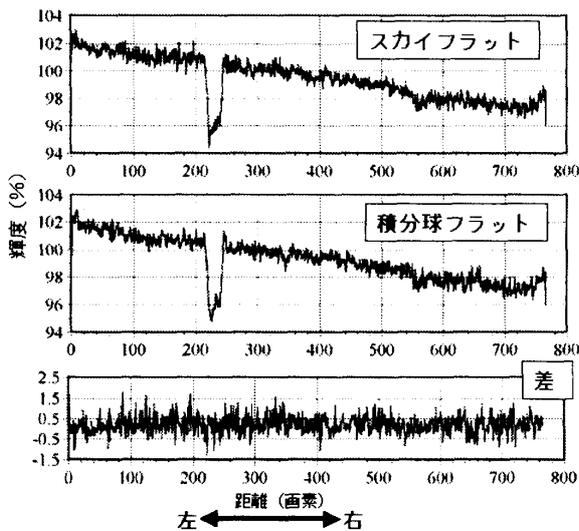


図8：図7の黒線部分1ラインのスカイフラットと積分球フラットの輝度分布図、および、その差。それぞれの画像の平均輝度を100%として規格化。

である。また、420nmという波長を選択した理由は、第一に、塗料の反射特性が悪くなる短い波長という不利な条件で良い結果ができれば、他の波長でも大丈夫であると予想される事、第二に、CCDカメラの感度が悪い短い波長を使う事で、露光時間を長くする事ができ、シャッター移動の影の影響をできる限り排除して、積分時間の異なるスカイフラットと積分球フラットの比較の精度を上げるという事である。図7はスカイフラットの画像である(768x512画素)。ただし、輝度を比較する1ライン(768x1画素)を抽出した部分を黒線で示してある。積分球フラットも肉眼では全く同じに見える。図8はスカイフラットと積分球フラットの1ライン分の輝度、および、両者の差を表したグラフである。それぞれの輝度はダークフィールド補正をほどこした後、画面全体の平均輝度を100%として規格化してある。青空は積分球に比較して明るい、規格化の際に平均輝度が異なると、ノイズの影響の比率が変わってしまうので、画像全体の平均値をほぼそろえた。スカイフラットは露出時間1.6秒で平均輝度は19151カウント、積分球フラットは露出時間5.7秒で平均輝度18822カウントであった。露出時間が十分に長いので、シャッターの影響は無

視できると考えられる。輝度グラフの谷状の部分は、ゴミによる輝度の落ち込みであり、図7でも同位置にゴミが写っている事が確認できる。また、右に行くほど輝度が減少しているのは、周辺減光効果である。周辺減光が同心円状でないのは、CCD素子の中心がレンズの光軸中心とはずれているためである。両フラットの差は非常に細かくランダム状に変動している。フラットフィールドの性能が悪い場合は、数ピクセル以上の長周期の変動として現れると考えられるので、この変動は、データ転送時やCCDのアンプで付加されたノイズであると考えられる。差の変動の振幅が小さい事から、スカイフラットと積分球フラットとがほとんど同じ精度であり、積分球フラットはスカイフラットの代用として十分使用可能であると結論づけても問題ないであろう。さらに厳密に精度を比較したい場合は、多数回の観測画像を平均化して比較すればよい。ただし、その場合はダークフィールドも観測回数分用意しておく事を忘れてはならない。本稿では420nmのバンドパスフィルターでの例を示したが、それぞれの観測機器の測定条件にあわせてスカイフラットと比較すれば、簡単かつ精度の高い検証が可能である。

#### 4.2 積分球開口部の輝度測定

積分球の開口部の輝度ムラを直接測定する事も試みた。冷却CCDカメラに一眼レフカメラ用のレンズ(PENTAX FA28mmF2.8AL)を取り付け、絞りをF11にし、178cm離れた位置から、開口部を露光時間0.05秒で撮影した。カメラのフォーカスは、開口部位置に調整してある。これは、積分球にとっては厳しい条件である。通常の使用では、天体望遠鏡は無限遠にフォーカスされているので、積分球内壁に微小なムラがあっても、観測されない。一方、開口部にフォーカスした際は、積分球内壁のパターンもかなりの部分解像されてしまう。通常この種の測定では分光放射計を開口部に保持して測定するが、その際も内壁のパターンが

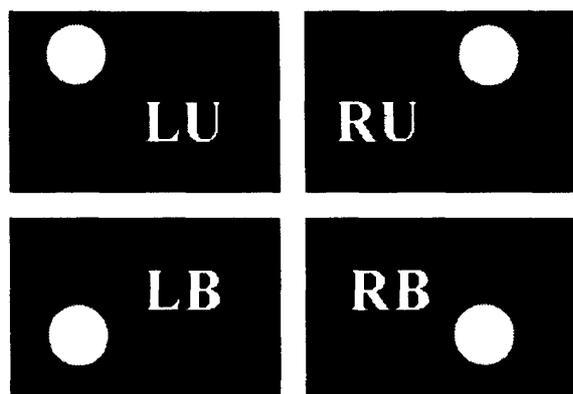


図9：開口部輝度分布測定用の4枚の元画像。それぞれ開口部の位置が画面上で占める場所を変えてある。

解像される事は無いであろう。本稿の測定で得られた画像をある程度平滑化したものが実際に問題となる輝度ムラと考える事ができるが、ここでは敢えて厳しい条件で試験する事にする。

測定に使用する冷却CCDカメラにもフラットフィールド補正が必要である。フラットフィールドそのものの質によるムラを開口部の輝度ムラと誤認してはいけないので、CCDカメラを開口部の面と平行に移動し、それぞれの位置で4回撮影を行った。また、この測定の際のフラットフィールド補正は、スカイフラットを用いた。なぜなら、フォーカス位置が近距離のまま積分球フ

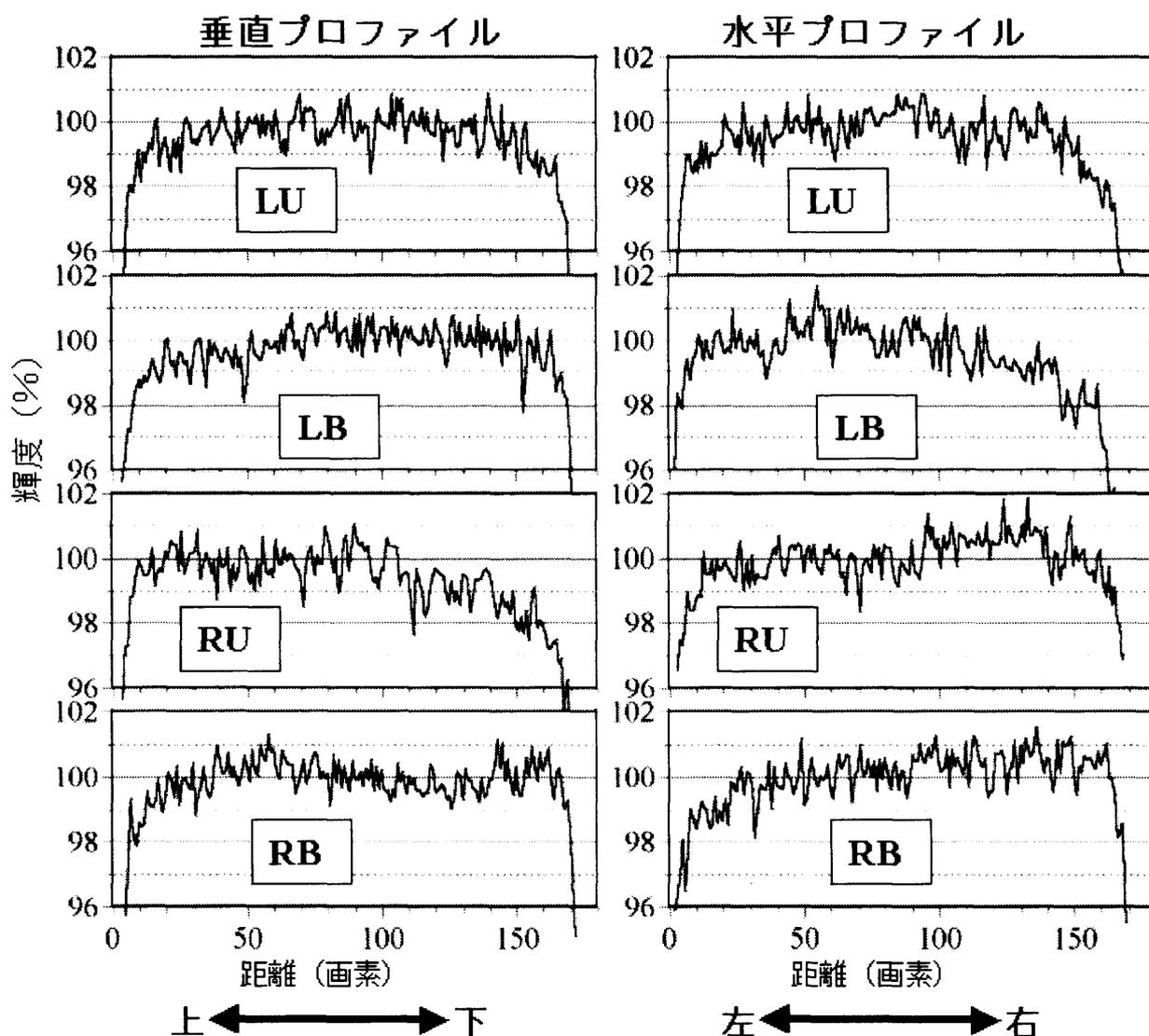


図10：開口部の中心を通る垂直、水平測線上の輝度分布。開口部中央11x11画素分の平均輝度を100%として規格化。

ラットを撮影すると、積分球内壁の細かなパターンが写ってしまうからである。図9は積分球開口部を4回、位置を変えながら撮影した画像である。

それぞれの画像について、開口部の中心を通る垂直、水平の2本の測線を取り、輝度をグラフ化したものが、図10である。それぞれの開口部の中心の11x11ピクセルの正方形部分の輝度の平均を100%として規格化してある。どの画像も、開口部のほぼ同じ場所を測定しているので、輝度パターンはほぼ同じになるはずであるが、実際は微妙に異なっていた。下から上を覗き込む角度のものは、上の方が明るくなり、上から下を覗き込む角度のものは、下の方が明るくなっている傾向があるように見える。また、右から左を覗き込むか角度のものは、左が、逆は右が明るくなっている傾向があるように見える。これは積分球開口部から放出される光に角度依存性があることを表しているのかもしれない。

しかしながら、その影響があっても、開口部のほとんどの部分で輝度の変化は $\pm 1\%$ に納まっており、周辺部でも $-2\%$ 程度に納まっている。この実験の輝度変化には観測時にCCDにのる電気的ノイズも含まれているので、その事も考慮すれば、開口部の周辺部を積極的に使うような無理をしなければ、 $\pm 1\%$ 程度(偏差では $2\%$ 程度)の精度はあると考えられる。ASTER等の地球観測衛星センサーの校正に使用されている大型積分球(直径1m、開口部径280mm)は、開口部の輝度偏差が $1\%$ 以内という事である[5](ただし、分光放射計による単波長測定)。それに比べると、手作り積分球は性能が落ちる。4.1のように望遠光学系に積分球を被せてフラットフィールドを撮影する時は、開口部のわずかな輝度偏差は結果にほとんど影響を与えていないようであるが、開口部にCCD素子を直接かざして画素間感度偏差を調べるような使い方をする場合には、開口部輝度偏差や角度依存性に関して使用目的を満足する精度があるか十分に検討する必要があるようである。

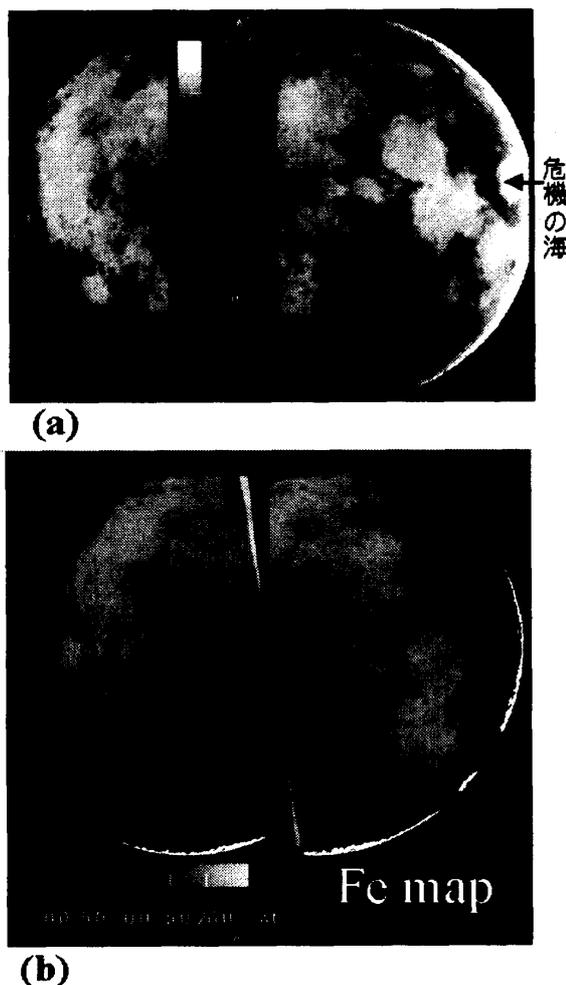


図11：750nm、950nmの月面画像を処理して作成したFeO含有量マップ。(a) フラットフィールド補正を省略して演算したもの。(b) 野外積分球でフラットフィールド補正をした後、演算したもの。

## 5. 活用例

フラットフィールド補正は $\pm$ 数%から10%前後の輝度ムラを $\pm 1\%$ 前後にまで押さえ込む事ができる。これは、天文画像を肉眼で観察する際には対象を良く知る者にしか判定できないほどの微妙な変化しか起こさないが、画像処理の元画像として使う場合には、このわずかな精度の向上が大きな成果に結びつく。図11(a)は、750nm、950nmのバンドパスフィルターを用いて月面を撮影し、Luceyらの方法を用いてFeOの含有量マップをつくったものである。この図を作成する際

は、精度の良いフラットフィールドが得られなかったので、フラットフィールド補正を省略している。計算法の詳細は文献6,7を参照されたし。このマップは危機の海より東の部分の定量精度が悪く、FeO濃度が実際の2倍以上に跳ね上がっている。この図は文献3の成果図であるが、当時は測光補正の技術的限界によるものと認識していた。今回、野外積分球を用いてフラットフィールド補正を行い、同様に作成したFeO含有量マップが図11 (b)である。この地図の表すFeO濃度が正確かどうかは別の議論が必要であるが、月の高地のほとんどではFeOの濃度は5wt%前後以下、月の海のほとんどはFeO濃度で20wt%以下であると推定されている[6]ので、月半球のほぼ全ての部分にわたって、異常濃度を示す部分がなくなっている事がわかる。わずかな元画像の変化が演算画像には大きな影響を与えている。今後ますます盛んになるであろう画像分光観測では、いかにフラットフィールド補正が大切であるかが実感される。

## 6. 今後への発展

冷却CCDカメラの急速な普及とともに、正確なフラットフィールドの需要は今後ますます増加するであろう。本研究では市販の材料のみでフラットフィールド用の野外積分球を製作し、その精度を検証する方法やその際に考慮すべき様々な勘所を示した。

野外で画像分光撮像をする研究者に、野外積分球はフラットフィールド撮像を観測と同条件で行う事ができる環境を提供する。また、冷却CCDカメラを積極的に活用しているアマチュア天文家にとっても、画質改善のための有効な道具となるであろう。

著者の一人TがNASDA、東大、秋田大共同の画像分光カメラ開発プロジェクトに参加して製作した野外積分球2号機がNASDAの月面画像分光地上観測望遠鏡の補正にも使用され始めている。さらなる高性能を求めようとするならば、球体内部の塗料の選択や、内

部の平滑化、光源の位置の工夫など、改良の余地はある。しかし、フラットフィールド用に限定するならば、積分球は専門のメーカーにゆだねなければ製造不可能というほど複雑な装置ではない。本稿を読んだ方々の中で、積分球を活用してみようと試みる方々が出現し、本稿を足がかりに、それぞれの用途に応じたサイズ、精度の積分球を開発して下さい、本望である。

## 謝辞

秋田大学工学資源学部の高橋正幸さん、佐藤昌枝さんには、野外積分球評価実験の補助をしていただきました。ここに感謝します。本稿をわかりやすくするために数々の助言をいただいた査読者の方に感謝します。本研究に使用した観測機材は、文部省科学研究費補助金(奨励研究A, 10740248, 佐伯和人)にて購入したものです。

## 参考文献

- [1]渡部潤一監修: アマチュアのための太陽系天文学, シュプリンガーフェアラーク東京, 219p.
- [2]福島英雄: 天文アマチュアのための冷却CCD入門, 誠文堂新光社, 192p.
- [3]佐伯和人他, 2000: 遊星人9, 2, 77-85.
- [4]Labsphere, Inc. TechGuide (online documents)  
[http://www.labsphere.com/tech\\_info/tech\\_pub.htm](http://www.labsphere.com/tech_info/tech_pub.htm)
- [5]佐久間史洋, 2000: 日本リモートセンシング学会誌 20, 590-601.
- [6]Lucey P.G. et al., 1998: J.Geophys.Res. 103, 3679-3699.
- [7]Otake, H. and Hirata, N., 1999: Proc. ISAS Lunar Planet. Symp. 32, 25-28.