

デジカメを光の明るさ・色の測定器として使う方法

2017/12/20 V.1.0

船橋高校 SSH (地学)

目次

1. デジタルカメラのしくみと基本操作

(1) 交換レンズの選択と操作

- ①焦点距離 ②焦点 (ピント)

知識：焦点距離の 35mm 判換算値

(2) カメラ本体の操作

- ③レンズ口径と絞り (F 値) ④シャッター (露光時間) ⑤重婚センサー (感度)

- ⑦画像ファイル (形式・サイズ)

知識：情報量の表し方 光の波長と色 RGB HSL RAW 形式

2. 画像ファイルの扱い方

(1) RAW 形式の画像ファイル

- ①ステライメージ ②マカリ

知識：FITS 形式とマカリ CSV 形式

(2) JPEG 形式の画像ファイル

- ①ペイント ②ImageJ ③GIMP

3. 応用発展的な操作

(1) 動画撮影

- ①動画特有の設定 ②再生 ③静止画の切り出し

(2) 長時間露光

(3) ダーク補正・フラット補正

(3) インターバル撮影

(4) フィルターの使用

(5) デジカメ以外の方法

4. 保有機種一覧

5. デジカメを活用した課題研究の例

- (1) 星の明るさと色
- (2) 青空の明るさと色
- (3) 星の瞬き
- (4) カラーアナライザーを用いた課題研究（参考）

6. 資料

- (1) EOS KissX7i のダーク補正・フラット補正に関するデータ
 - ①ダークノイズ ②周辺減光

はじめに

近年、デジタルカメラ（以下デジカメと称す）の普及により、画像を数値情報として扱うことができるようになりました。本校課題研究でも、デジカメを用いて光の明るさ・色を定量的に計測する試みが多数なされ、ノウハウも蓄積してきました。そこで、本稿ではこれまでの経験をまとめ、課題研究入門者向けに、デジカメを光の計測器として使う方法を解説します。

1. デジタルカメラのしくみと基本操作

図1はカメラのしくみを簡略に表しています。カメラは発明当初から現在の最新式に至るまで、その基本構造は変わっていません。ちなみに、この構造は人間の目とよく似ています。ただし、従来は受光部がフィルムであったのに対し、デジカメでは撮像素子（CCDなどの電子デバイス）が用いられています。ここでは、初心者がカメラを操作する場合を想定して、主な構成部分である①～⑥の役割と操作の仕方を順に解説してゆきます。なお、デジタルカメラと言っても、一眼レフ型、コンパクトタイプ（コンデジ）、スマホ等の内蔵カメラなど様々な商品がありますが、ここでは課題研究を念頭に主に一眼レフ型デジカメについて、具体的には地学科所有のキャノン製 EOS Kiss を例に説明します。その他のカメラでも考え方は共通です。

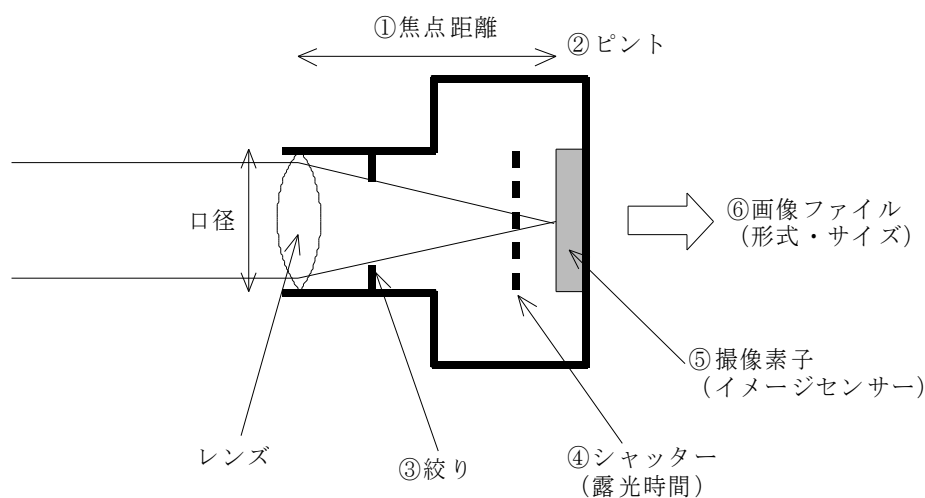


図1 デジタルカメラの仕組み

（1）交換レンズの選択と操作

一眼レフカメラの最大の特徴は目的に応じてレンズを交換できることです。そこで、まず私達は目的に合ったレンズを選択する必要があります。

① 点距離とは・・・

レンズにおいて最も重要な要素は焦点距離です。焦点距離とは、図2のように、無限遠から平行光線が来るときの、レンズから焦点までの距離です。なお、実際のレンズの構造は複雑なので、ここでは単純化した一枚の仮想的凸レンズで表しています。図2からわかるように、焦点距離によって写真に写る範囲（画角 θ ）が決まり、焦点距離が長いほど画角は狭くなります。ズームレンズは焦点距離を連続的に変えられるので便利ですが、カメラに標準装着されている安価なズームレンズは光学的性能がやや劣ります。ズームレンズのカバー範囲を越えた画角（超広角や超望遠）が必要な場合や高度な光学的性能が必要な場合は単焦点レンズを用います。

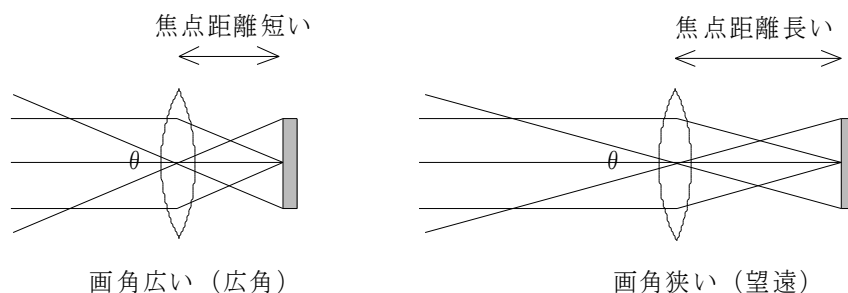


図 2 レンズの焦点距離と画角の関係

知識

焦点距離の 35mm 判換算値

従来のカメラでは長らく幅 35mm のフィルムが用いられてきた。図 2 のように、受光面の大きさと焦点距離が決まれば、一義的に画角が決まる。その為、画角をフィルムカメラ（受光面 36×24mm）の焦点距離で言い表す習慣が定着してきた。ところが、デジカメの受光部の大きさは 23.6×15.8mm（APS-C）と小さく（機種による違いもある）、画角も小さくなる。既に慣れ親しんだ焦点距離と画角の関係を改めるのは面倒なので、35mm フィルムカメラの画角に相当する値に換算した焦点距離がよく使われている。

表 1 本校地学科所有のレンズの焦点距離と 35mm 判換算値

焦点距離	35mm 換算値	長辺画角	単焦点レンズ	ズームレンズ	
4.5mm	7.3mm	136°	SIGMA4.5mm／f 2.8	EF10-20mm／f3.5-4.5 EF18-55mm／f3.5-5.6	魚眼
10mm	16mm	96°	SIGMA10mm／f 2.8		超広角
18mm	29mm	64°			広角
55mm	89mm	23°			標準
200mm	323mm	6.4°	CanonEF200mm／f2.8		望遠 超望遠

レンズ交換時の注意！

レンズ交換時にはカメラ本体やレンズの内部がむき出しになる。その為、レンズ交換は、内部を触ったり、ホコリが入ったりしないように細心の注意を払いながら、手早く行う必要がある。内部をさらしたまま放置するなど、もってのほか。くれぐれも注意するように。

② フォーカス 焦点（ピント）の調節・・・

図 2 は無限遠からの平行光線の場合です。一方、有限距離の物体から出発する光は平行ではなく、その分だけ焦点距離を調整する必要があります。これが焦点（ピント）の調節です。現在のカメラはオートフォーカス機能（AF）が優れていますが、以下の点には注意が必要です。

- ・AF は一面の青空などコントラスト境界のない被写体が苦手です。その場合はマニュアルで調整します。
- ・極端に近距離の被写体にはマクロモード（チューリップマーク）で撮影します。
- ・液晶モニターを見ながら撮影する場合（ライブビュー）、シャッター半押しで合焦部分が表示されるので、被写体にピントが合っていることを確認してから撮影（シャッター全押し）します。

(2) カメラ本体の操作

一般的にはオートモード (A) ないしプログラムモード (P) で撮影すれば、撮影者は特に設定を気にすることなく写真を撮ることができます。しかし、測定器としてデジカメを使う場合は、マニュアルモード (M)、絞り優先プログラムモード (Av)、シャッタースピード優先プログラムモード (Tv) のいずれかを用いて、設定を自分で行う必要があります。ここでは、全ての設定を自分で行うマニュアルモードについて説明します。その際、まずプログラムモードで撮影してみると、バランスの取れた③絞り値、④露光時間、⑤感度の組合せをカメラが判断して撮影するので、その値を参考にすると良いでしょう。

③ レンズ口径と絞り (F 値) …

撮影にあたっては、まず F 値を設定します。

$$F \text{ 値} = \text{焦点距離} / \text{口径 (絞り径)}$$

レンズ口径の尺度として、開放時 (絞りなし) の F 値が用いられます。同じ焦点距離 (画角) に対し、F 値が小さいほどレンズ口径は大きくなります。口径が大きいと、多くの光を集めるため、天体、夜間など微弱な光を扱う場合は有利になります。また、レンズには大きさの変えられる絞りがついていて、光量の調節ができます。絞れば絞るほど (F 値を増すほど)、レンズ中央部の光のみを採光することになり、これは口径が小さくなるのと同じことです。絞るほど光量は減りますが、ピントの合う前後の範囲 (被写界深度) が大きくなる、レンズの光学的性能が上がるなどの利点があります。図 3 は、開放時 (絞りなし) で F4 のレンズに対し、絞りを絞った時の光量の変化を表しています。光量を半分にするを「1 段絞る」と言います。

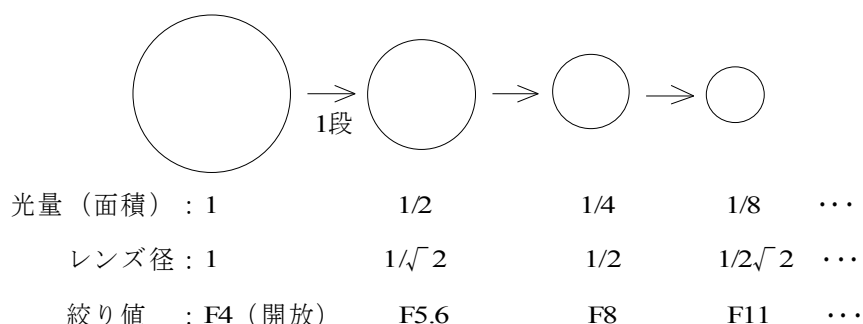


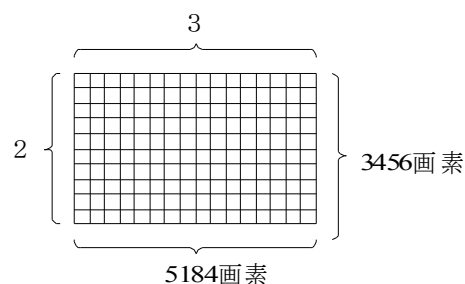
図 3 絞りと光量の関係

④ シャッター (露光時間) …

光量は絞りだけでなく、露光時間 (シャッタースピード) によっても調節できます。露光時間が大きいほど、露光量は多くなるが、被写体が動いている場合、ブレも大きくなります。また、同じ露光時間でも、望遠レンズほどブレが目立つようになります。手ブレを防ぐためには、露光時間 (秒) を $1 / \text{焦点距離 (mm)}$ 以下に設定すると良いと言われています。これより露光時間を多くしたいときは、ブレ防止のため、三脚を用います。

④ 撮像素子 (感度)

撮像素子 (イメージセンサー) としては CCD や CMOS が使われています。受光面は図のように細かな素子 (画素) の集合であるので画素数が多いほど、解像度の高い画像が記録できます。EOSKiss では $5184 \times 3456 = 17,915,904$ 画素です (機種による)。



光量に応じて撮像素子の感度（ISO 値）を変えることができます。標準感度は ISO100 であり、感度を 2 倍にすると ISO200 になります。感度が高いほど、少ない光量での撮影が可能になりますが、その分ノイズも増すので、むやみに高感度にしない方が良いでしょう。

⑤画像ファイル（形式・サイズ）

デジタル画像は、図 4 のような細かな格子の 1 マス 1 マスに色がついたものと考えればよいでしょう。図 4 の受光素子 1 個が画像の 1 コマ（1 画素）にあたります。各画素の色・明るさは、R・G・B（光の 3 原色）の組合せで表現します。各色の強弱（階調）は 14 ビット（ $2^{14}=16,384$ 段階）で記録されます。図 4 の受光センサーが出力する情報は（ 2^{14} ）³ $17,915,904=2^{752,467,968}$ 通り、すなわち 752,467,968 ビット＝約 90MB と膨大な情報量になります。そこで、通常の使用では、画素数を縮小し、さらに情報量を圧縮してファイルサイズを小さくします。その代表的な方式が JPEG 形式で、今日のほとんどのデジタルカメラ（スマホ等のカメラを含む）で採用されています。その為、JPEG 形式で記録する場合は、予めファイルサイズ（画素数や圧縮率）決めておく必要があります。JPEG 形式は手軽で便利ですが、圧縮の際に様々な情報の加工が行われるので、研究のために正確なデータが必要な場合は、情報加工を（ほとんど）行わない RAW 形式を用います。

知識

情報量の表し方

コンピュータでは電流の on/off（2 通り）を用いて情報を処理する。そこで、デジタルの情報量は 2 進法を用いる。例えば、下のように電流の on/off（1 か 0）を処理・記録できる部品が 8 個あれば、2 進法 8 桁（ $2^8=256$ ）通りの情報を扱えることになる。

1	1	0	1	1	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

2 進法 1 桁分の情報量（2 通り）が情報量の最小単位であり、1 ビットという。例の情報量は 8 ビット（ 2^8 通り）である。8 ビットを 1B と言う。

1024B = 1KB

1024KB = 1MB

1024MB = 1GB

1024GB = 1TB

※1024 を約 1000 と見なし、10 進法と同じよう K, M, G…を使うときもある。

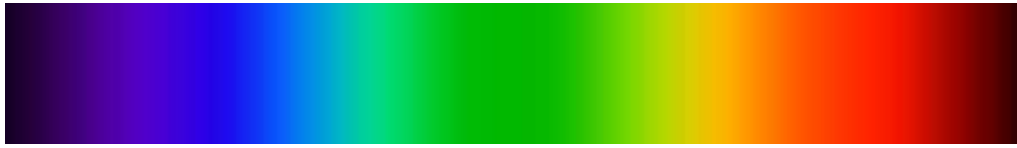
例：ハードディスクの容量表示、通信における情報量など

2 進法で表現すると桁数が非常に多くなる。そこで、4 ビット（ $2^4=16$ 通り）分の情報を 16 進数の 1 桁に置き換えて表す方法がある。その場合、0～9, A, B, C, D, E, F, G の 16 文字を用いる。下のように 16 進法 8 桁であれば、 $16^8=4,294,967,296$ 通りの情報を表すことができる

A	1	B	8	7	C	0	5
---	---	---	---	---	---	---	---

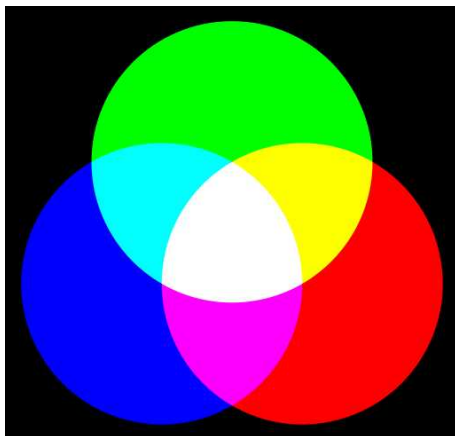
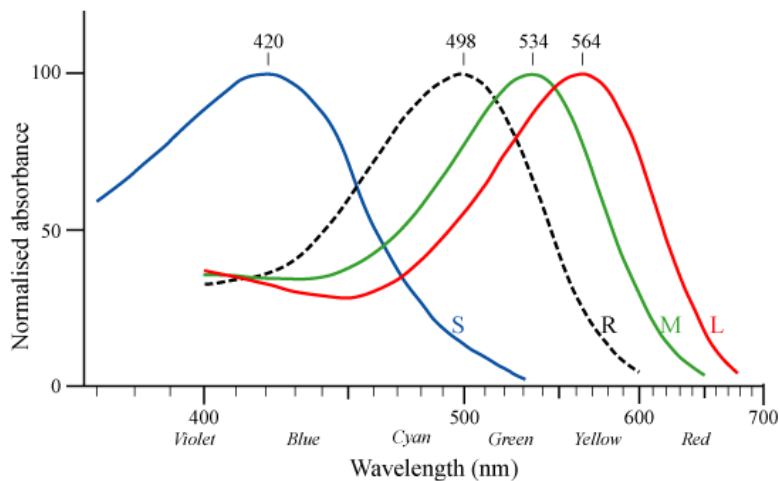
光の波長と色

私達の目が感じることができる光（可視光）は電磁波の 1 部である。可視光は波長 400nm～650nm の電磁波に相当する。可視光より波長が短いと紫外線 UV，X 線，γ 線・・・に，長いと赤外線 IR，電波になる。

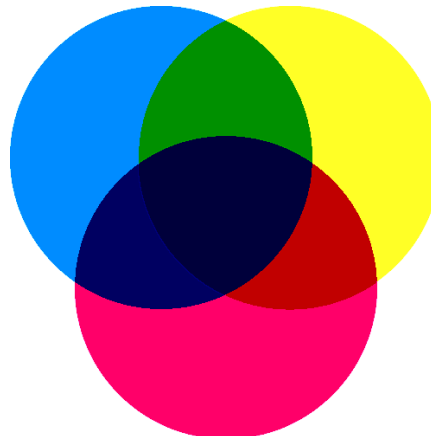


RGB

人間の色覚は感度ピークの異なる 3 種類の視細胞（錐体，下図の S・M・L）の情報を脳で合成することにより生じている。つまり色は物理量ではなく，人間の心理的産物である。例えば，波長 550nm の単色光を見ても，波長 500nm の光（緑色光）と 600nm の光（赤色光）の混合光を見ても，どちらも人間には黄色に見え，両者を区別することはできない。つまり，黄色という物理量はないのである。



光の 3 原色（加法 3 原色）



吸収の 3 原色（減法 3 原色）

実際には，赤 Red，緑 Green，青 Blue の組合せで，人間が感じるほぼ全ての色を表現することができ，TV や液晶画面等の自ら発光する演示物は，この 3 色光の足し算で色を作っている。これを光の 3 原色（加法 3 原色）という。一方，印刷物の場合は，3 種類（以上）のインクの微小ドットに白色光（太陽光や室内灯）があたり，一部波長が吸収された残りの反射光（黄 Yellow，青緑 Cyan，赤紫 Magenta）がまとめて目に入ることによって色を表現している。これを吸収の 3 原色（減法 3 原色）と言う。

HSL

3変数で色を表す方法の一つ。RGBより人の感覚に馴染みやすい、よく用いられる。

H（色相 Hue）：色味を表す。「赤 0～緑 120～青 240～赤 0」と 360° の円環（色相環）で表す。



S（彩度 Saturation）：色の濃淡（鮮やかさ）を表す。RGBのうち、1ないし2色からなる色は原色（鮮やか）である。これに対し、3色目が加わるほど、色は淡く中間色になる。彩度はどのくらい原色に近いかを表す。定義により値の表し方が異なる。



L（輝度 Lightness）：明るさを表す。RGBの和。

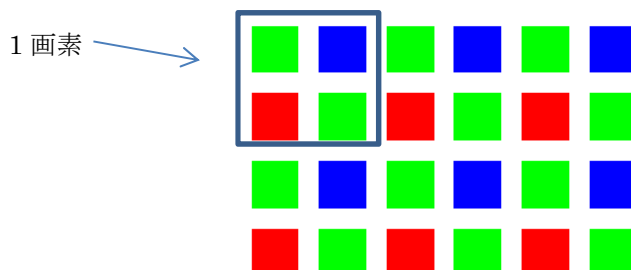


RAW 形式

画像情報を加工せずにそのまま記録する方法で、形式はカメラメーカーによる（企業秘密）。RAWとは生の^{なま}意味。ただし、次のような欠点がある。

- ・ファイルサイズが大きい→大容量の記録メモリー、高性能のパソコンが必要
- ・通常の画像閲覧ソフトでは開けない →専用ソフトが必要

EOSKissには、1画像をRAW形式とJPEG形式の2タイプのファイルで同時に記録するモードがあるので、それを使うと良い。なお、実際の受光センサーでは1画素につきR・G・G・Bと4つの受光素子が割り当てられている（ベイヤー配列）。厳密に言うと、通常のRAW形式では受光素子各個のデータがそのまま出力されているわけではない。



2. 画像ファイルの扱い方

(1) RAW 形式の画像ファイル

処理の手順と使用するソフトウェア

RAW 形式ファイル →①ステライメージ (PC ソフト) を用いて FITS 形式に変換

→②マカリ (PC ソフト) を用いて測光等を行う →数値データ (CSV ファイル) →③エクセルで分析

①ステライメージ

アストロアーツ社製天体写真用ソフト

(StellaImage7: 地学室 PC にインストール済み)

処理手順

- ・RAW 形式ファイルを開く
- ・読み込み設定 (右図)
- ・名前を付けて保存
→ファイルの種類を FITS ファイルに指定して保存



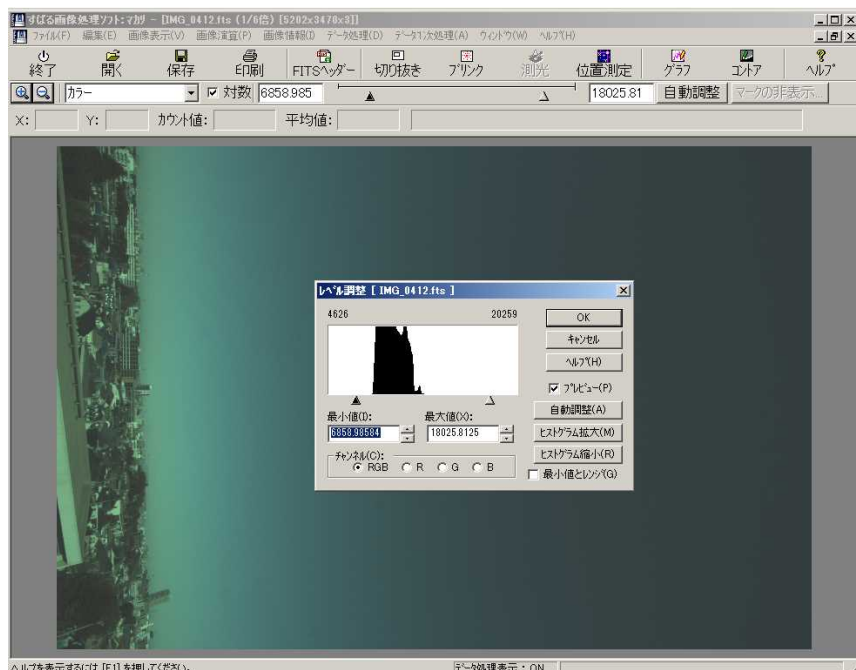
②マカリ

国立天文台が配布するフリーソフト

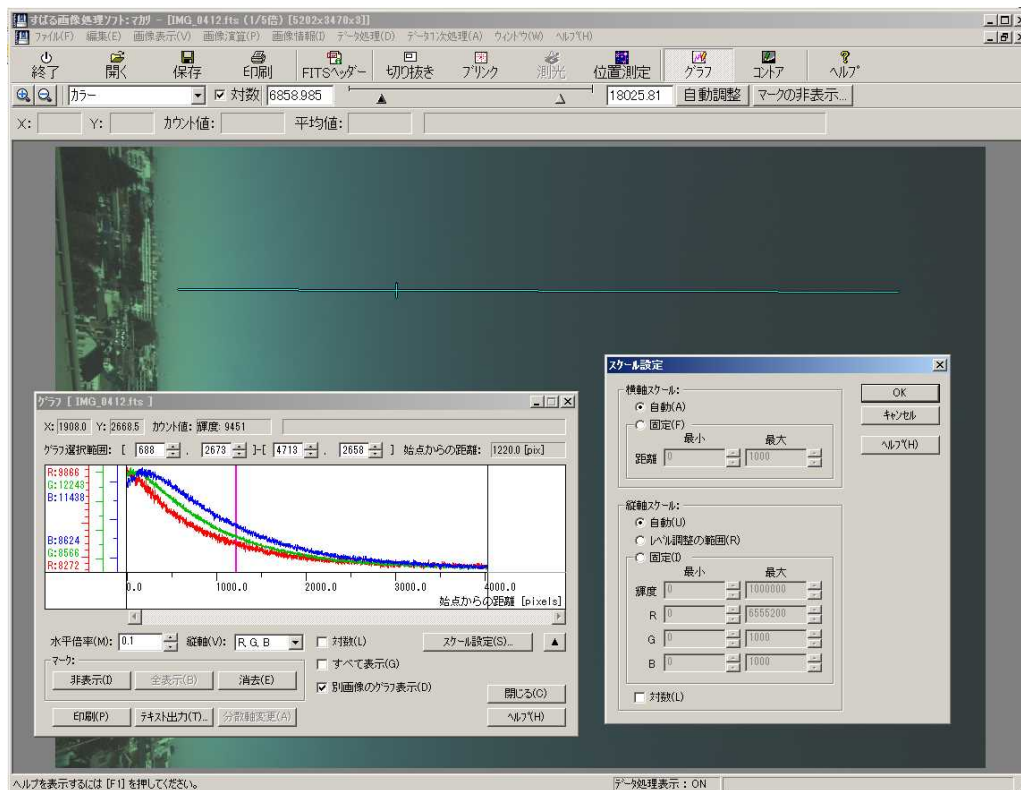
(マカリ 2.0: 地学室 PC にインストール済み)

処理手順

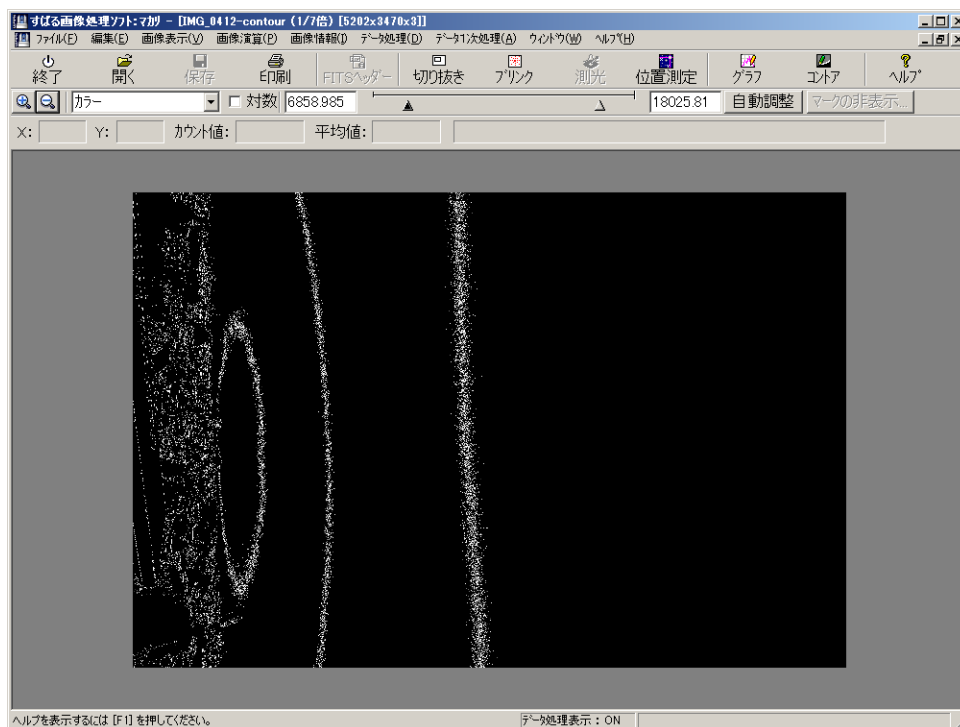
- ・FITS 形式ファイルを開く
- ・読み込み設定 (右図)
- ・画像表示→自動レベル調整→拡大・縮小調整
画像表示では「対数表示」「レベル調整」などで作業しやすい表示にする。元データは変更されない。



- ・グラフ機能で任意の線分ないし矩形領域の RGB 値をグラフ化
- ・スケール設定により調整。特定色や複数のグラフも表示可能。線分上の位置をグラフ上で表示可能。
- ・テキスト出力→ファイルの種類を CSV ファイルに指定して保存



- ・コントラスト機能で等高線を描画



- ・測光機能で星の明るさを測光
- ・その他の機能

③エクセル

マイクロソフト社製表計算ソフト（Excel2010：地学室 PC にインストール済み）
処理手順（略）

知識

FITS 形式とマカリ

FITS 形式とは天文学における画像ファイルの国際標準形式である。FITS 形式の画像をアマチュアでも簡単に扱えるように国立天文台が開発したフリーソフトがマカリ Makali である。マカリはシンプルで使いやすく、国立天文台のウェブサイトから誰でもダウンロードできる。

CSV 形式

縦横に並んだ数値を記録する汎用ファイル。数値をカンマやスペースで区切って並べただけの簡単なもので、表計算ソフトはもちろん、メモ帳（Windows 付属の簡易テキストエディタ）等でも読み書きができる。実際にはエクセルで開き、そのままエクセル形式で保存すればよい。

（２）JPEG 形式の画像ファイル（作成中）

画像上で長さを計ったり、色や明るさのおよその値を計るだけであれば、軽くて扱いやすい JPEG 形式ファイルを用いると良いでしょう。ソフトには様々なものがあります。

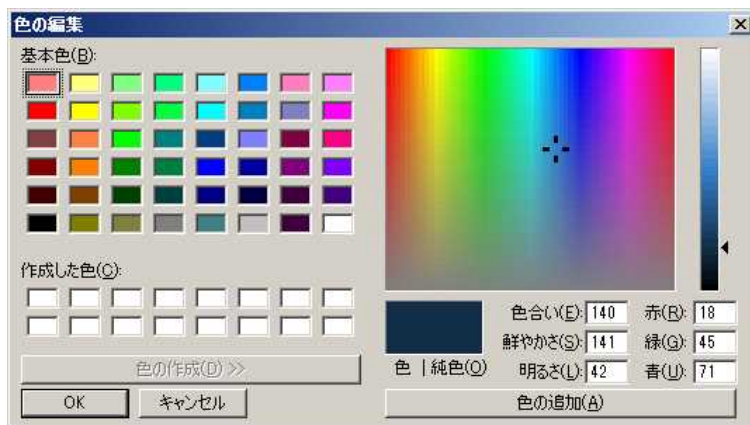
①ペイント

Windows 標準搭載の簡易ソフト

- ・色の編集→カラーパレット

色合い H・鮮やかさ S・明るさ L
と RGB の確認に便利

階調は 255 段階（ $2^8=8$ ビット）



②ImageJ

画像解析ができるフリーソフト

（地学室 PC にインストール済み）



3. 応用発展的な操作（作成中）

（１）動画撮影

①動画特有のカメラ設定

- ・画像サイズとフレームレートの選択 フレームレート（fps）とは1秒間あたりのコマ数
1920×1080／30fps 1920×1080／24fps 1280×720／60fps 640×480／30fps
- ・ファイル形式 mov
- ・その他の設定は静止画と同じ

②再生

- ・Quick Time（アップルのフリー動画再生ソフト）や Windows Medeia Player（マイクロソフトのフリー動画再生ソフト）で再生する。Quick Time はコマ送りやスロー再生が使いやすい。

③静止画の取り出し

専用ソフトを用いて1コマ1コマを静止画(JPEG形式)として取り出すことができる。
フリーソフト Free Video to JPG Converter など

（２）長時間露光

①三脚に固定して撮影

天体の場合は日周運動による光跡が写る。露光時間が30秒以上の場合は、シャッタースピードをBに設定し、レリーズでシャッターを開閉することにより露光時間を調節する。

②赤道儀による追尾撮影

天体を点像として写す場合は、カメラを赤道儀に載せ、日周運動に合わせて星を追尾しながら写す。露光時間を増やせば、微弱な光も蓄積するので、暗い天体（星雲・銀河など）でも写すことができる。追尾にはモータードライブを使うことが多い。PCによりコントロールできる機種もある。

（３）ダーク補正・フラット補正

①ダーク補正

完全に光のない状態でシャッターを切っても、受光素子のバックグラウンドノイズがわずかではあるが現れる。これを補正するには、対象画像から遮光状態の画像（ダークフレーム）の分を差し引けばよい。これがダーク補正であり、ステライメージなど画像処理ソフトにより行う。ダークフレームは補正対象と同時・同条件で撮影しておく必要がある。（末尾資料参照）

② フラット補正

均質光を撮影しても、レンズの光学性能の限界のため、視野周辺の方が暗く写ってしまう。これを周辺減光という。これを補正するためには、対象画像を均質光を撮影した画像（フラットフレーム）で割り算すればよい。これがフラット補正であり、ステライメージなど画像処理ソフトにより行う。フラットフレームはレンズ設定を同じにして、曇天時に白い不透明板の透過光を撮影すると良い。（末尾資料参照）

（４）インターバル撮影

カメラを固定し、一定時間おきに連続的に撮影する方法。撮影間隔は数秒～数分に設定できる。雲の動き、植物の生長など動きの遅い現象を記録することができる。インターバル撮影機能は一部機種に限られる。

（５）フィルターの使用

しばしば常用されるスカイライトやUVカットフィルターは、測光時には使わない。レンズ保護用MCフィルターを使っても良い。大洋の撮影など、減光が必要な場合、NDフィルターを使う。

（６）デジカメ以外の方法

①カラーアナライザー

物体の反射光あるいは放射光のRGB（HSL）を簡単に測光できる機器。

4. 保有機種一覧

一眼レフ本体

機種名・整理番号	メーカー	記録画像	最大感度 ISO	ビデオ	
EOS KissX2	キャノン	4272×2848 RAW/JPEG	1600	なし	本体固定液晶
EOS KissX3 2台 A/B	キャノン	4752×3168 RAW/JPEG	6400	1920/30fps 1280/60fps	本体固定液晶
EOS KissX5 2台 A/B	キャノン	5184×3456 RAW/JPEG	6400	1920/30fps 1280/60fps	バリアングル液晶
EOS KissX7i	キャノン	5184×3456 RAW/JPEG	12800	1920/30fps 1280/60fps	バリアングル液晶

コンパクトデジカメ

機種名・整理番号	メーカー	記録画像	最大感度 ISO	ビデオ	
WG-1 6台	ペンタックス	7MB JPEGのみ	6400	1280/30fps	インターバル撮影
EXILM EX-100F (ハイスピード カメラ)	カシオ	4000×3000 RAW/JPEG		1920/30fps 224/1000fps 224/480fps	ズーム 28～300mm (35mm 換算) F2.8 インターバル撮影 バリアングル液晶

5. デジカメを活用した課題研究の例

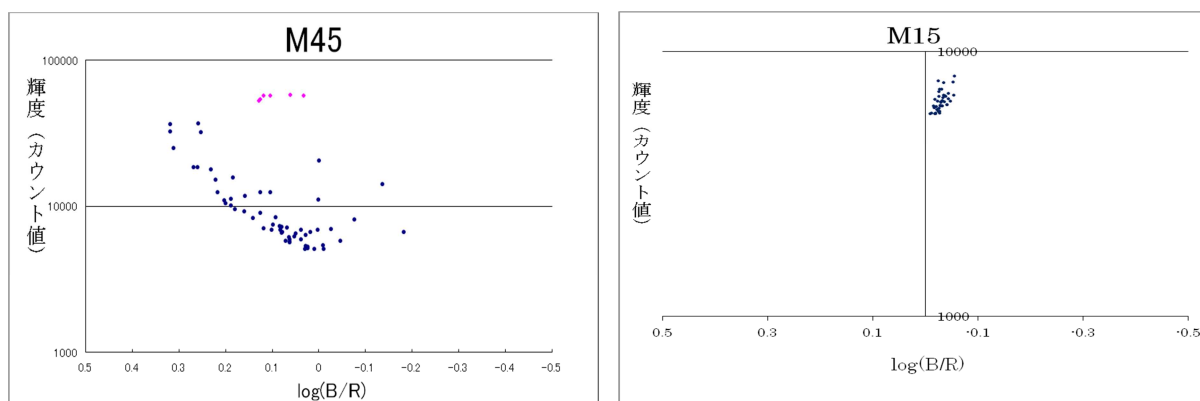
(1) 星の色と明るさ

①2009 年理数科 1 年課題研究（小山田）

夕日の高度と色・明るさと関係を研究した。本校課題研究としては、デジカメを測光器として用いた最初の事例。

②2010 年地学部 1・2 年研究（鈴木ほか）

散開星団と球状星団をそれぞれ赤道儀で追尾撮影し、星団を構成する構成の色と明るさをマカリにより測光し、色－明るさ図（HR 図）を作成し、散開星団と球状星団で大きな差があることを示した。高校生が HR 図を作成した事例としてはごく初期と思われる。

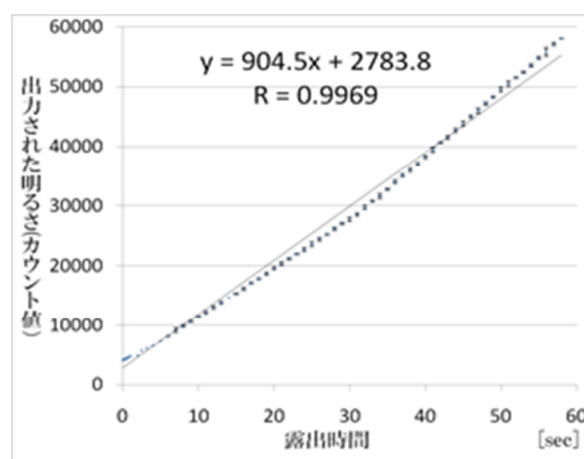


③2010 年地学部 1 年研究

ペルセウス座流星群を固定撮影し、光跡の明るさと色をマカリにより測光した。流星は明るさにかかわらず、緑色味の強い色（酸素の輝線）で光っていることを示した。

④2011 年理数科 2 年課題研究（飯塚・亀田）

前年度の経験を踏まえ、デジカメを恒星の測光器として使うために、その性能・特性を極めて精密に検証した研究。各画素の RGB データの補正曲線を導いた。



(2) 青空の色と明るさ

①2012 年理数科 2 年課題研究（筒井・栗原・小島）

青空（全天）を 1 年間魚眼レンズで撮影し、空の明るさ・色の季節変化を研究した。本校課題研究としては、青空を測光した最初の事例。

②2015 年理数科 2 年課題研究（安達・小高）

前々年度の研究を踏まえ、青空の季節変化に透明度の測定を加えた研究。透明度は望遠レンズで撮影したスカイツリーのコントラストを定量的な目安に用いた。

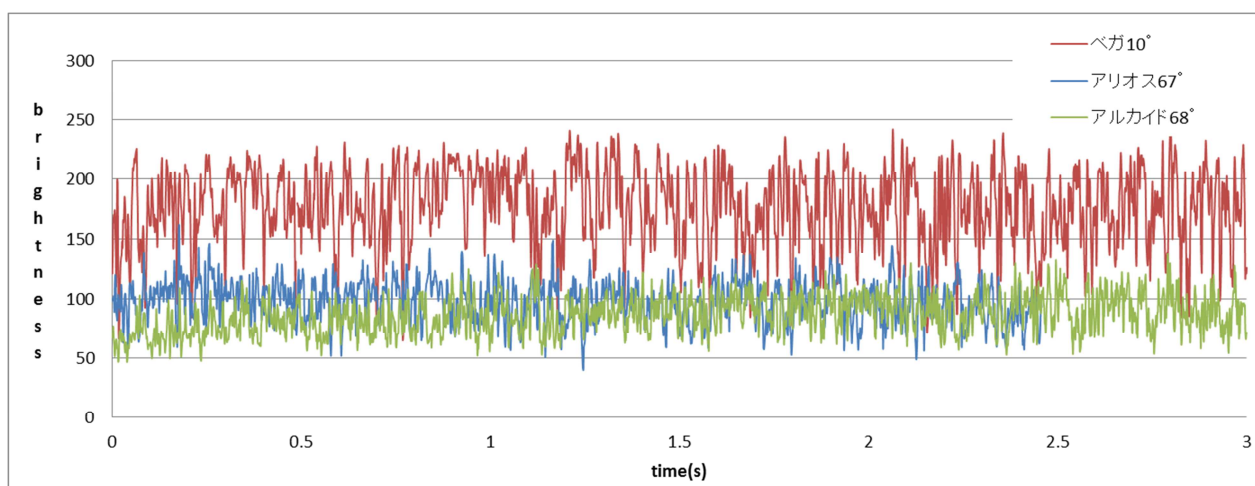
③2017 年理数科 2 年課題研究（宮本・成瀬）

先行研究を踏まえて、青空の明るさ・色の光度変化と太陽との相対的な位置関係を研究した（実施中）。

（3）星の瞬き

①2014 年普通科 2 年課題研究（菅井・池嶋）

デジカメで星が瞬く様子を動画撮影し、切り出した静止画から星の瞬きを定量的に研究した。瞬きの記録には静止画の流し撮り方も用いた。



②2016 年理数科 2 年課題研究（余・吉田）

前々年度の研究を踏まえ、動画撮影から星の瞬きを研究した。動画の測光精度の検証、恒星の高度と瞬き具合の関係を研究した。

（4）カラーアナライザーを用いた課題研究（参考）

①2014 年度理数科 2 年課題研究（日下・田川・松崎）

深成岩の分類指標として良く知られる色指数の代わりに、深成岩を粉末にして RGB 値を計測し、顕微鏡観察で求めた色指数や密度との関係を検討した。

②2017 年度理数科 2 年課題研究（戸村）

様々な粒度の研磨材で研磨した岩石表面の乱反射の程度を RGB 値を計測して求めた（実施中）。

6. 資料

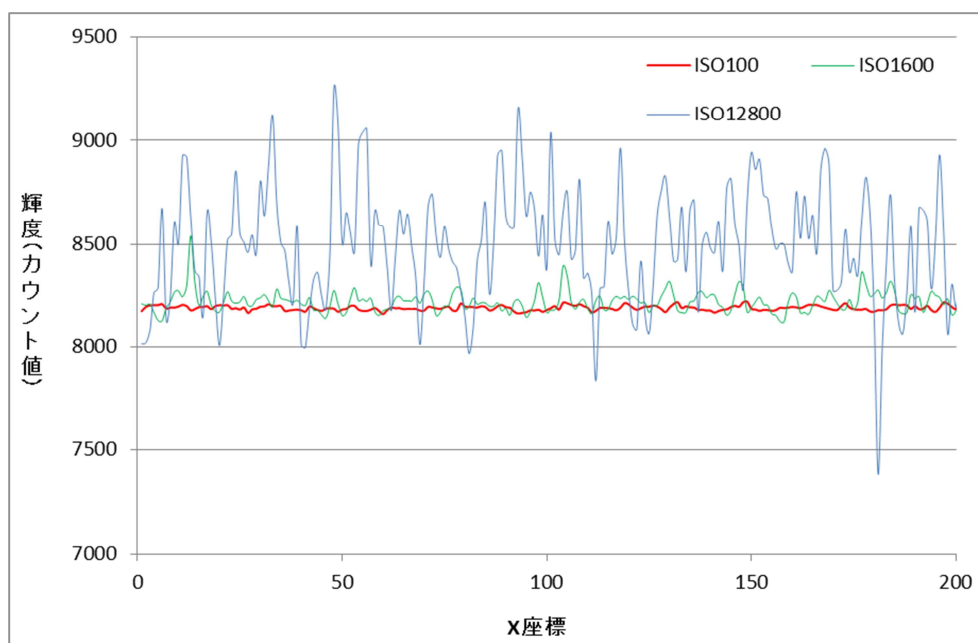
(1) EOS KissX7i のダーク補正・フラット補正に関するデータ

①ダークフレームの検討

対象画像：レンズキャップを閉め、30 秒間露光して撮影。RAW 形式画像をステライメージ 7 で FITS 形式に変換し、画面中央部の線分上の 1000 画素をマカリで測光。

a. 感度とダークノイズの関係

感度	カウント値 (G) (平均)	標準偏差
ISO100	8191	14.5
ISO1600	8245	71.7
ISO12800	8662	531.2



中央部 200 画素の輝度分布

b. 露光時間とダークノイズの関係

カウント値 (G) の平均と標準偏差

感度	1/1000 秒		1 秒		30 秒	
ISO100	8189	14.2	8189	14.2	8191	14.5
ISO1600	8193	46.2	8192	46.2	8245	46.2
ISO12800	8195	307	8196	309	8662	307

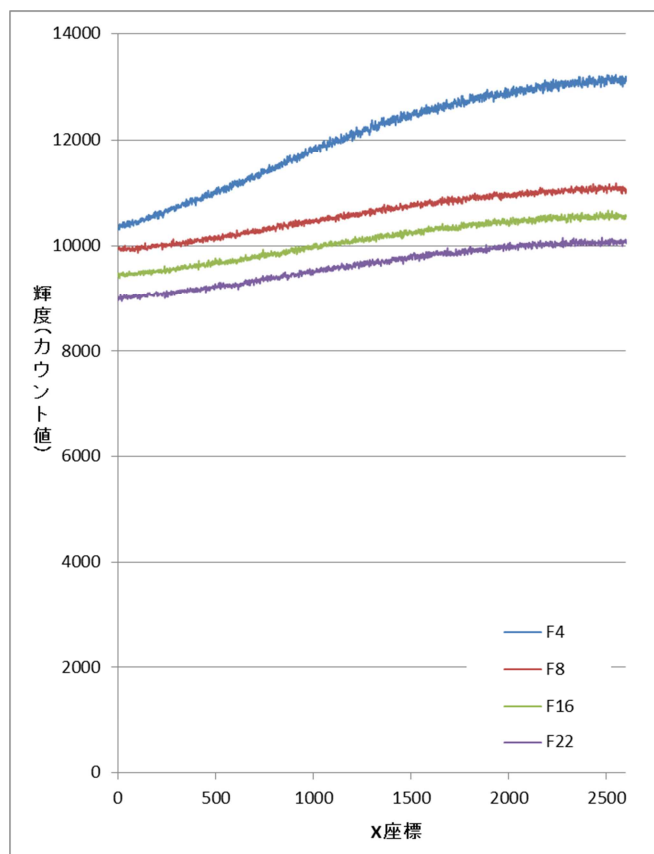
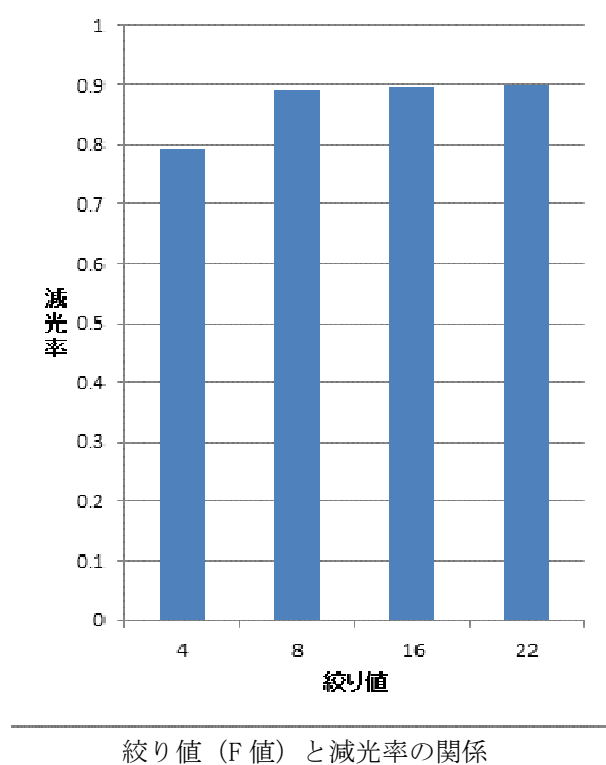
感度、露光時間ともにダークノイズの平均値に大きな違いは見られない。ただし、画素毎のばらつきは露光時間にかかわらず、高感度時に大きくなる。

③ フラットフレーム（周辺減光）の検討

レンズ：キャノン超広角ズーム EF10-22mm（10mm で撮影）

撮影方法：タブレット端末（iPad）のディスプレイに白色を表示させ、さらに乳白色アクリル板を介してレンズを直接あてがい撮影。

絞り値	画面中央部の 50 画素 の平均輝度 (A)	画面周辺部の 50 画素 の平均輝度 (B)	差 B-A	減光率 B/A
F4	13127	10378	2749	0.791
F8	10667	9539	1128	0.894
F16	10554	9455	1099	0.896
F22	10468	9411	1058	0.899



周辺減光のプロファイル

見やすいように開始点 (X:0 の輝度) をずらしている。

当該レンズでみる限り、開放 (F4) から F8 に絞ると周辺減光は大きく改善するが、それ以上絞っても変わらない。十分に絞っても、10%程度の周辺減光があるので、視野全体を使った測光を行う場合は、フラット補正が必要。