

論文題目

月面分光撮像装置の開発

宮城教育大学学校教育教員課程理科教育専攻

D1261 齋藤正晴

平成 15 年 2 月 10 日

目次

要旨

第1章 はじめに

- 1-1 月面分光装置開発の意義
- 1-2 本研究のテーマ

第2章 近赤外カメラ『SU320 - 1.7』の特性評価

- 2-1 『SU320 - 1.7』の仕様
- 2-2 CCDの量子化効率と分光感度特性
- 2-3 撮像と解析について
- 2-4 ダークノイズ特性調査
 - 2-4-1 ダークノイズとは
 - 2-4-2 ダークノイズの露出時間に対する依存性と平均量調査
 - 2-4-3 暗電流直流成分のエリアセンサ内分布
 - 2-4-4 Dead Pixel 調査
 - 2-4-5 ランダムノイズの測定
 - 2-4-6 像順序による影響調査
- 2-5 CCDの輝度線形調査

第3章 『BJ 41L』の特性評価

- 3-1 本調査の意義
- 3-1 アンチブルーミング (ABG) 機能について
- 3-3 『BJ 41L』の仕様
- 3-4 ICX285AL』の分光感度特性
- 3-5 CCDの輝度値線形調査

第4章 分光器について

4-1 分光器

4-1-1 波長分解能

4-1-2 スリット幅

4-2 使用天体望遠鏡の適正 F 値検討

第5章 まとめ

謝辞

引用文献

要旨

月は地球唯一の衛星であり、最も身近な天体である。これまでアポロ計画を始めとする様々な探査機が月面調査を行い、その組成・表層鉱物についての研究が進められ明らかにされてきた。しかしアポロが月面に着陸し、岩石を採取したのはごく限られた領域で、月面全域の表面構成物質に対する知識は少ない。

本研究では鉱物の反射スペクトル特性から月面全域の組成鉱物を理解するため、天体望遠鏡・分光器・CCD 撮像装置から構成される地上からの月面連続分光撮像装置の開発を目的としその予備調査を実施した。

分光観測は、バンドパスフィルタによる分光撮像や分光器を用いたスペクトル取得が過去に実施されている。フィルタを用いた分光撮像では天体を 2 次元イメージングすることが可能であるが、連続スペクトルデータを得るには、透過中心波長の異なるフィルタが数十枚も必要となる。一方、分光器を用いると詳細なスペクトルデータの習得が可能であるが、イメージングはできない。今回我々が目的とするのは、CCD 面の 1 方向を 1 次元のイメージングとして、もう 1 方向をスペクトル撮像に使い望遠鏡を動かすことで 2 次元となる分光撮像システムである。撮像装置の性能は、撮像波長領域・解像度・測光感度に影響を与えるため、十分な事前調査が必要である。

そこで本研究では、分光器に搭載する近赤外センサー並びに可視センサーの性能試験と分光器との組み合わせによる仕様検討を行い、近赤外センサー CCD カメラの性能試験を実施し、特性について調査するとともに分光イメージング装置の設計を行った。

近赤外 CCD カメラにおいては月面反射輝度範囲でのリニアリティ特性の確認ができ、分光器への搭載が可能であることがわかった。また、ABG 機能を有する CCD カメラでも機能が働かない輝度範囲内であれば測光観測にも使用が可能であることが判明した。

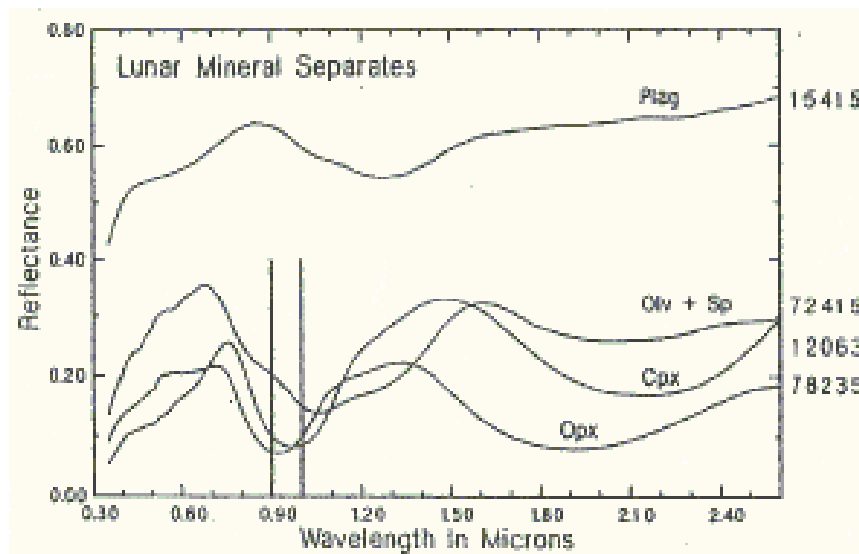
第1章 はじめに

1-1. 月面分光装置の開発意義

本研究では月の全域の鉱物組成を理解するため、望遠鏡・分光器・CCDカメラを用いて地上から月面を分光撮像するための装置開発を目的としている。

月の岩石は高地の斜長岩と海の玄武岩に分類され、玄武岩は鉄・マグネシウムに富む輝石やカンラン石を含み、チタン含有量によって分類される。つまり岩石中の各鉱物の含有量を求めることができれば、これらの岩石の分布を知ることができる。

図 1.1 は月面サンプル中に含まれる鉱物の反射率で、415nm, 950nm 付近に反射率の低下がみられるが、これらは Ti^{4+} , Fe^{2+} のスペクトル吸収によるものである。このように、玄武岩に含まれる Ti^{4+} および Fe^{2+} は、415nm, 950nm の波長付近にそれぞれ吸収帯をもつことが知られている。【Pieters et al., 1993】



Plag : 斜長石

Olv+Sp : スピネルを含むカンラン石

Cpx : 単斜輝石

Opx : 斜方輝石

図 1.1 月面サンプル中の鉱物の反射率 【Pieters et al., 1993】

月面をこの吸収がみられる 1000nm 付近の波長領域で地上から分光撮像を行い、スペクトルデータを取得し鉱物の同定を可能にできる。

1-2. 本研究のテーマ

本研究では天体望遠鏡・分光器・CCD 撮像装置から構築される、地上からの月面連続分光撮像装置の開発を目的としている。

開発中のシステムは連続分光とイメージングを、1000nm付近という近赤外波長領域で同時に行う。これまで、フィルタを用いての分光撮像によるスペクトルデータの取得は行われてきた。この方法ではイメージングはできるが、連続スペクトルを取得するには膨大な枚数を撮像する必要があり、その誤差もデータに多大な影響を与えてしまう。また、グレーティングを用いた連続分光では、詳細で正確なデータを得ることはできるが、イメージングはできない。本研究ではこれを同時に行う装置の開発を目的にしている。

この中で特に撮像装置の性能は、撮像波長域解像度・測光感度に影響を与えるため、十分な事前調査が必要となる。

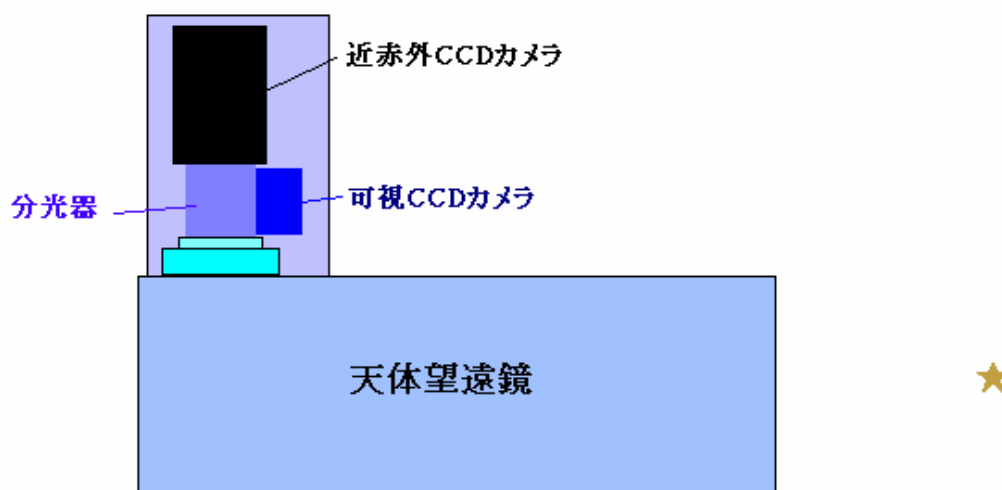


図 1.2 分光撮像システム概要

近赤外線波長領域センサーは、ノイズの特性調査・輝度値線形テストを行い、カメラの特性データを取得した。

次に可視領域において、アンチブルーミング機能を備えた CCD センサーの性能評価を実施した。このカメラは約 600g と非常に小型に設計されているため、天体望遠鏡にかかる重量の負荷を軽減することができる。しかしアンチブルーミング機能を有する CCD センサーでは、正確な輝度値データを得ることができない可能性がある。そこでこの機能を備えた機材利用の可能性を探るため、調査・使用検討を行った。

第2章 近赤外カメラ『SU320 - 1.7』の特性評価

『CCD』とは、『Charge Coupled Device』を略した名称であり、日本語には「電荷結合素子」と訳される。CCDは画素（ピクセル）と呼ばれる小さな受光面からなり、各画素内に入ってきた光子を電子にデジタル変換して蓄える。画像はこれらの各画素の蓄光状況により構成される。

【引用 福島1996】

月面連続分光撮像では可視波長領域（～1000nm）と近赤外線波長領域（1000nm～）に光を分割し、イメージングを行う。これは、対象波長領域を1台でカバーできるような安価なCCDセンサーが現存しないためである。

以下に近赤外波長領域撮像用に検討している中のCCDセンサー『SUI320 - 1.7』の性能評価を示す。

2-1 . 『SU320 - 1.7』の仕様

SU社の『SU320 - 1.7』のCCDセンサーを、近赤外波長領域の撮像用に検討した。このカメラの仕様（カタログ値）を表2-1.に示す。

このカメラに用いられているセンサーは、SU社製SU320 - 1.7T1である。この1つのピクセルは一辺の長さが28[μm]の正方形で、横320ピクセル・縦240ピクセル・合計76800個のピクセルで1CCDを構成している。ここで、表4-1.にある「Pitch」とは、図4-3.に示すように隣り合うピクセルの中心距離のことを指す。ピクセル自体のサイズは28×28[μm]、隣り合うピクセルの端と端の間隔は12[μm]となる。受光量の検討を行う場合は、ピクセルサイズが有効サイズとなり、一方空間解像度の検討等を行う場合は、Pitchの値が有効サイズとなる。

画像データは12[bit]で保存され、輝度値は4096段階で表される。

また、このCCDセンサーはCCDの温度が18[]一定に自動制御される仕組みになっている。これにより外部に特別な冷却装置の装着・撮像時の冷却作業が不要になる特徴があるが、外部からの冷却ができずノイズが大きい問題点がある。

(SENSORS UNLIMITED Inc., SU320-1.7RT InGaAs Area Camera Operation Manual)

画素サイズ	320 × 240 [Pixels]
CCD チップ	InGaAS センサ
ピクセルサイズ	28 × 28 [μm]
Pitch	40 [μm]
スペクトル反応領域	0.9 ~ 1.7 [μm]
最大量子化効率	70% [1.0 ~ 1.6 [μm]]
保存画像データ	12 [bit]
CCD 温度	18 []
カメラサイズ	15.85 × 10.32 × 10.32 [cm]
カメラ重量	1.1 [kg]
露出時間	127[μsec] ~ 16.3[msec] (8 段階)
作動環境 [温度]	0 ~ 40 []
[湿度]	95%以下

(SENSORS UNLIMITED Inc., SU320-1.7RT InGaAs Area Camera Operation Manual)

表 2-1. 『SU320 - 1.7』のスペック



图 2-1.SU320-1.7 侧面

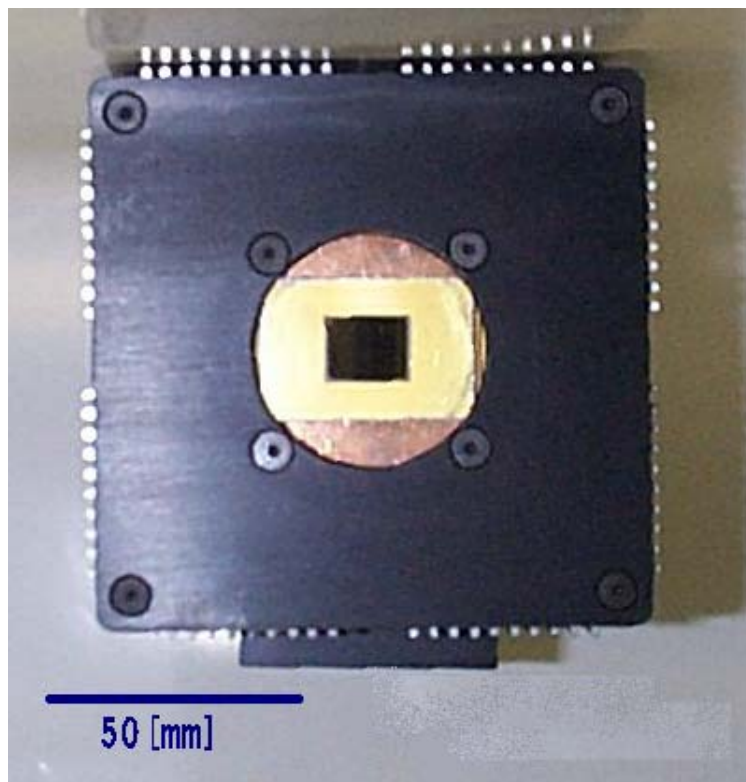


图 2-2.SU320 - 1.7 前面 (CCD 受光面)

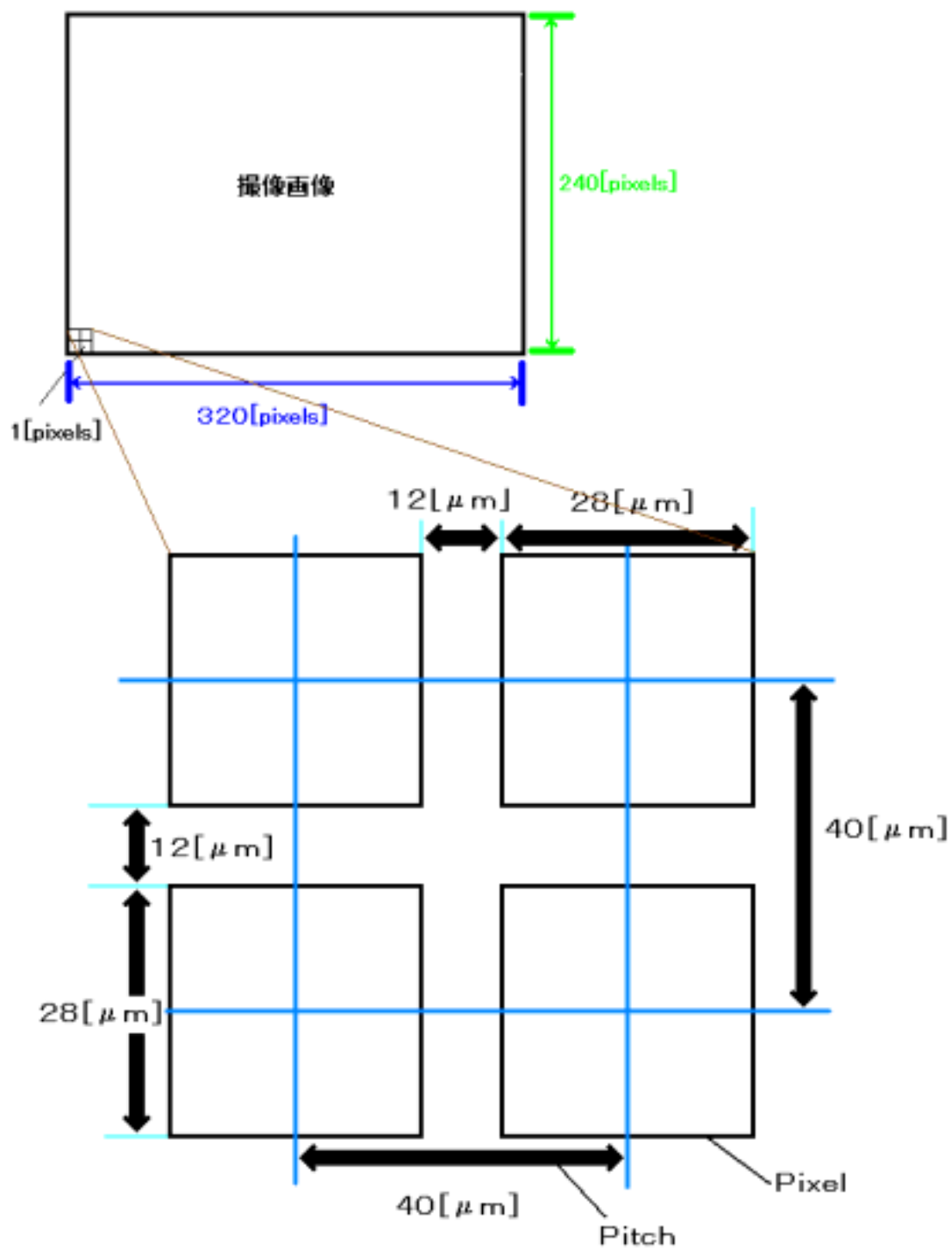


図2-3. Pixel と Pitch について

2-2. CCD の量子化効率と分光感度特性

CCD 感度は、量子化効率 (quantum efficiency) を用いて表現される。量子化効率とは、単位時間内の入射光のうち、実際にデジタル信号として記録される光の割合を示す。量子化効率は、波長により光子エネルギーの強度が変化するので、波長の関数となる。また、CCD 感度の波長依存性のことを分光感度 (Responsivity) と呼ぶ。分光感度 (R) は量子化効率 () を用いて次のように定義される。分光感度の単位はエネルギーにより発生する電流の割合となるため、[μA]/[μW]で表される。

【引用 福島 1996】

$$R = \quad \cdot \quad (\quad [\text{nm}] / 1240 \quad) \quad (\text{式 2-1})$$

SU320 - 1.7 の量子化効率・分光感度を図 2-4・図 2-5.に示す。最大量子化効率は、1.0 ~ 1.6[μm]の波長範囲で 70%となる。

この CCD カメラでは、スペクトル吸収 continuum がひける 1500[nm] ~ 1600[nm]の波長領域が含まれるように、1700[nm]以下の波長の光を検出する必要がある 1000[nm] ~ 1700[nm]となる。グラフには宮教大所有のバンドパスフィルターの中心透過波長, 1050[nm], 1250[nm], 1550[nm]も同時に示す。

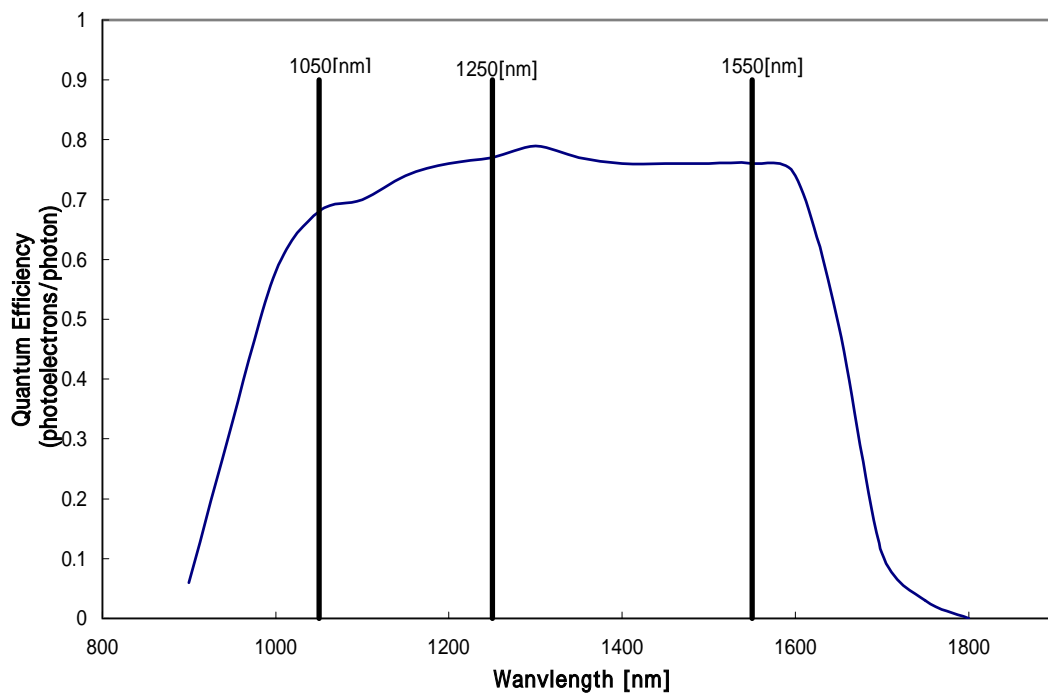


図 2-4. 近赤外 CCD の量子化効率並びにバンドパスフィルタの中心波長

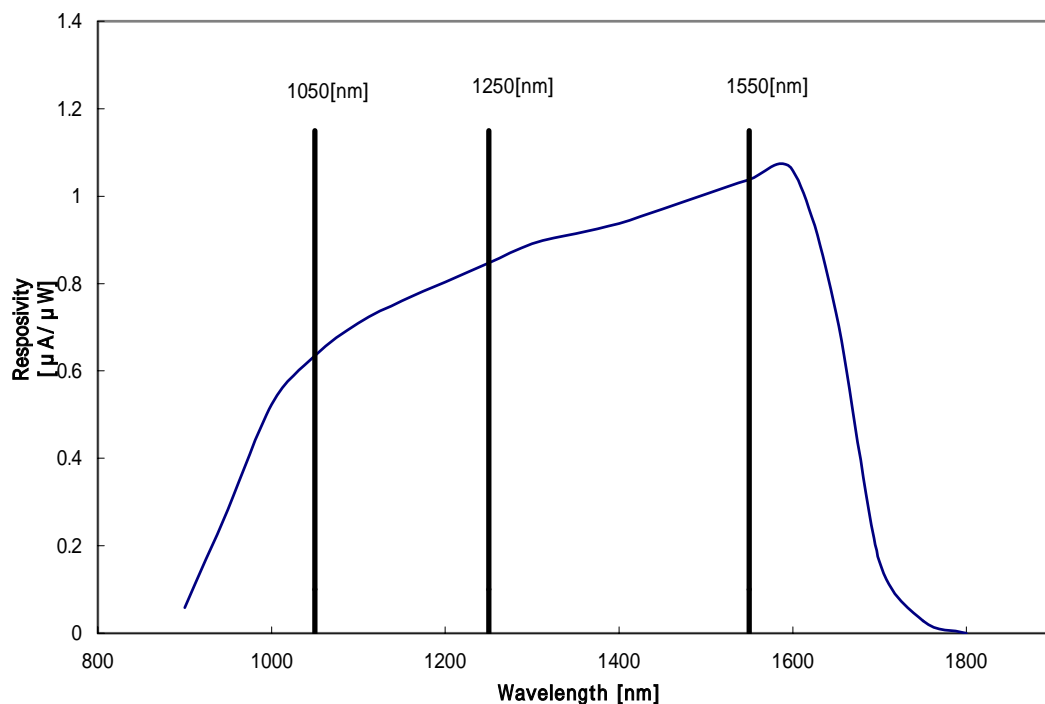


図 2-5. 近赤外 CCD の分光感度特性並びにバンドパスフィルタの中心波長

(SENSORS UNLIMITED Inc., SU320-1.7RT InGaAs Area Camera Operation Manual)

2-3. 撮像と解析について

SU320 - 1.7 の操作には、計測ソフトウェア『Lab View』と『IMAQvision』で作られたプログラムを用いる（平尾 2001）。

このプログラムを用いて撮像枚数を指定し、静止画を自動的にパソコンに取り込み保存する。表 2-2.に示すように、SU320 - 1.7 の露出時間は 8 段階に設定されている。

スイッチナンバー	SW00	SW01	SW02	SW03	SW04	SW05	SW06	SW07
Exposure Time [msec]	0.127	0.254	0.508	1.017	2.034	4.068	8.135	16.27

表 2-2.各スイッチの露出時間

(SENSORS UNLIMITED Inc., SU320-1.7RT InGaAs Area Camera Operation Manual)

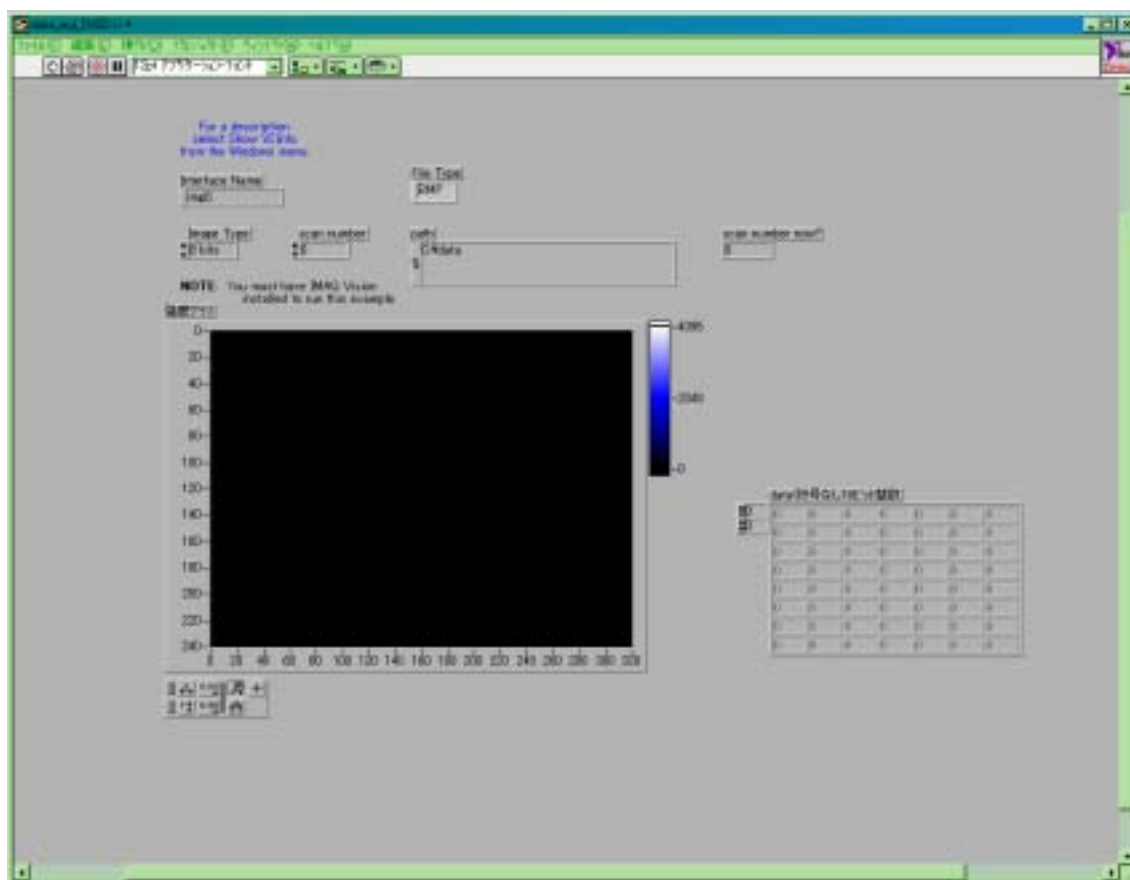


図 2-6.SU320 - 1.7 操作ソフト

また、可視・近赤外線波長領域のカメラで撮像した画像の処理及び解析には、画像解析ソフト『ENVI』を用いる。

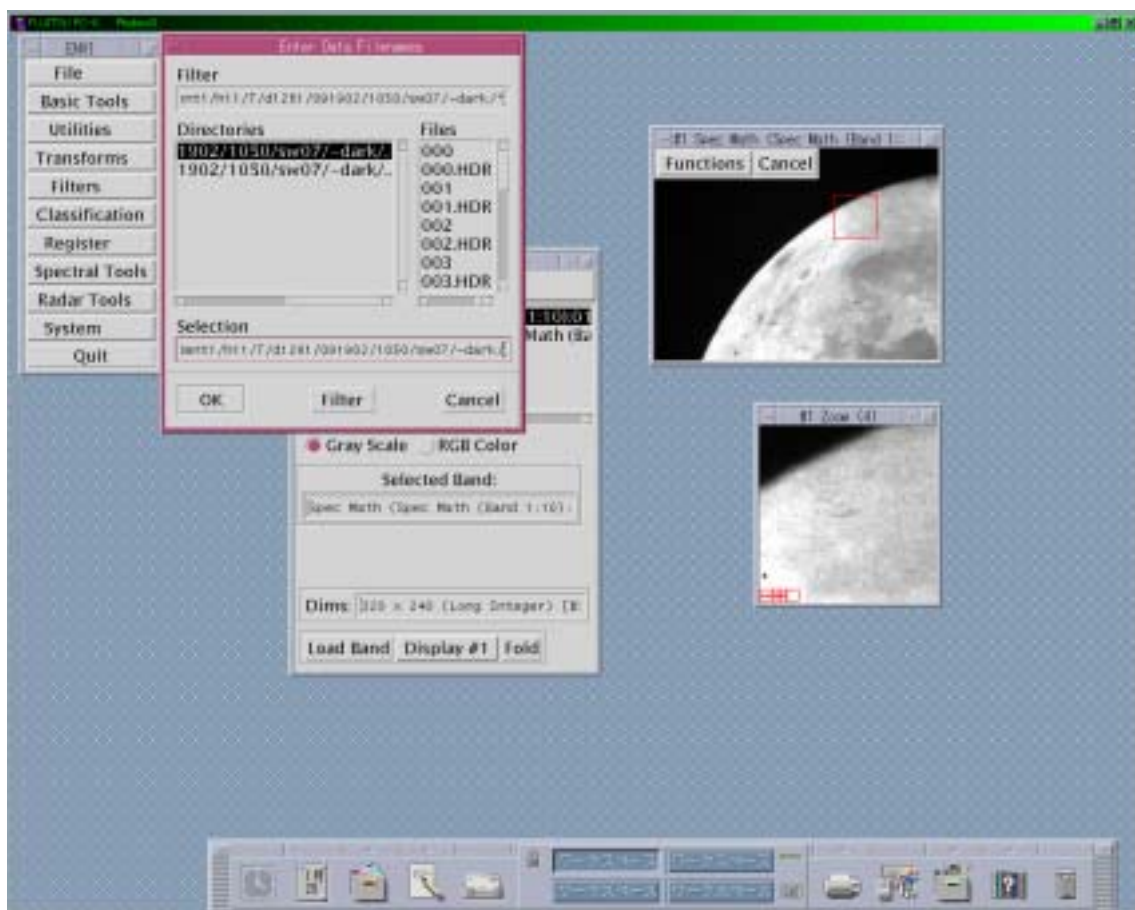


図 2-7. 画像処理・解析ソフト『ENVI』

2-4. ダークノイズ特性調査

2-4-1. ダークノイズとは

CCDでは光が全く入射しない状態でも熱による電流が生じ、画素ごとに全くレベルの異なる電化信号が出力され、画像にはランダムノイズとして表れる。このノイズを暗電流ノイズと呼ぶ。また、電荷信号転送やスイッチングなどによってもノイズが現れる。このような電子回路で発生した電氣的ノイズを「読み出しノイズ」と呼ぶ。CCDは冷却することにより、これらのノイズが減る特性がある。さらにノイズとは異なるが、露出時間が0の時でもバックグラウンドのレベルが0にならないように電氣的に出力値をもちあげる補正を行っている。これを「バイアス」と呼び、そのレベルも各画素で値が異なる。これらのノイズ成分を含めて光が当たらなくても存在する輝度値情報を「ダークノイズ」と呼ぶ。ダークノイズは各画素で異なるため、画像データには不規則なパターンでノイズが含まれていることになる。

【引用 福島1996】

2-4-2 ダークノイズの露出時間に対する依存性と平均量調査

出力上限は電荷量により制限されるため、ダークノイズが大きいと実質的な光出力のダイナミックレンジが狭くなる。上述したようにCCDには冷却によりダークノイズを減らす特性があるが『SU320-1.7』はCCD温度を18[]一定に制御する機構があるため、これ以上の冷却が不可能である。そこでダークノイズの露出時間に対する依存性と、ダークノイズの平均量を調査する必要がある。本節ではダークフレーム画像を撮像し、露出時間と暗電流量の関係を調査した。

【ダークフレーム画像の撮像】

CCD面に光が入らないようにカメラのレンズ部分に蓋をし、露出時間（スイッチ）を変えて撮像を行った。ダークフレーム撮像は20枚連続してSW00～07の8段階で各々実施した。さらにここでは、画像における横方向・縦方向の画素番号をそれぞれsample・lineと定義する（図2-8.）。

連続撮像した10枚の画像のピクセルごとに輝度値を加算平均し、さらに全体（320×240ピクセル）の平均輝度値を露出時間ごとに測定した。露出時間に対するダークノイズ値を図2-9.に示す。また、画面での全ピクセルの1標準偏差を誤差としている。

電気信号と輝度値の線形性が保たれているのであれば、露出時間が長くなると比例してノイズの光量輝度も比例して大きくなるが、SU320-1.7は露出時間が大きくなるにつれて、ダークノイズは増加するが、増加量は減少していく傾向にある。が、図 2-10 では、ダークノイズが露出時間に対してリニアリティが存在しないように見える。これは『SU320-1.7』が、ダークノイズを取り除いた後の光入力信号が露出時間に対してリニアリティを持つように設計されている。そのため、露出時間が長くなるにつれてバイアス値が大きくなり、ダークノイズが相対的に小さくなるよう設計されている。SU 社もダークノイズの露出時間に対するリニアリティは保証していない（平尾 2001）。露出時間が最も長いSW07(16.27[msec])でもノイズのDN値は平均約940[*digit*]と飽和容量の約23%を占めるのみである。ただし、SW00に関してはSW01に比べて値が10倍以上も大きくなる。これは単純にSW00の露出時間ではノイズが増えるということだけでなく、露出時間が短くなるとカメラの露出時間にエラーが生じる可能性を示唆している。SU社もこの短い露出時には保証していない。このため、SW00露出時間での撮像は分析には使用できないと言える。

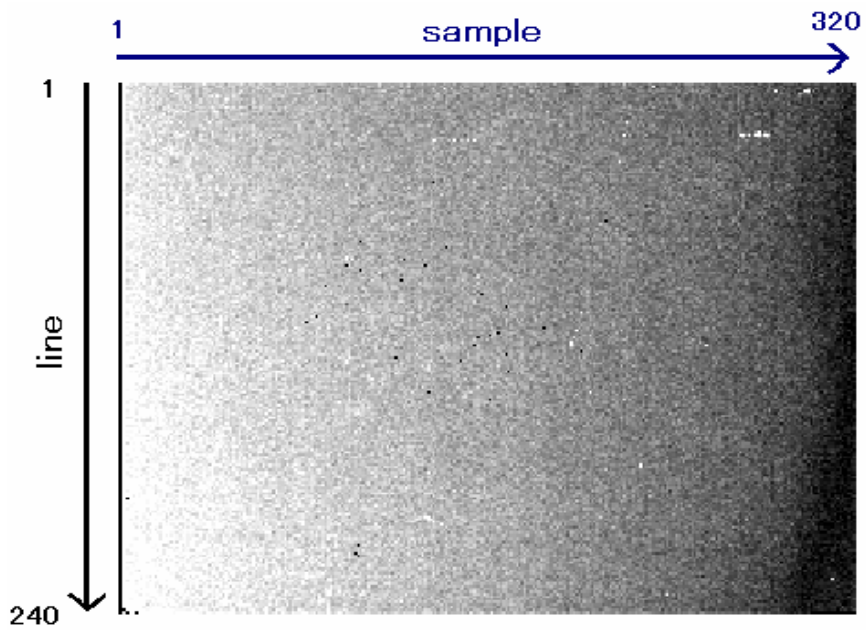


図 2-8 . 画面における『sample』と『line』の定義

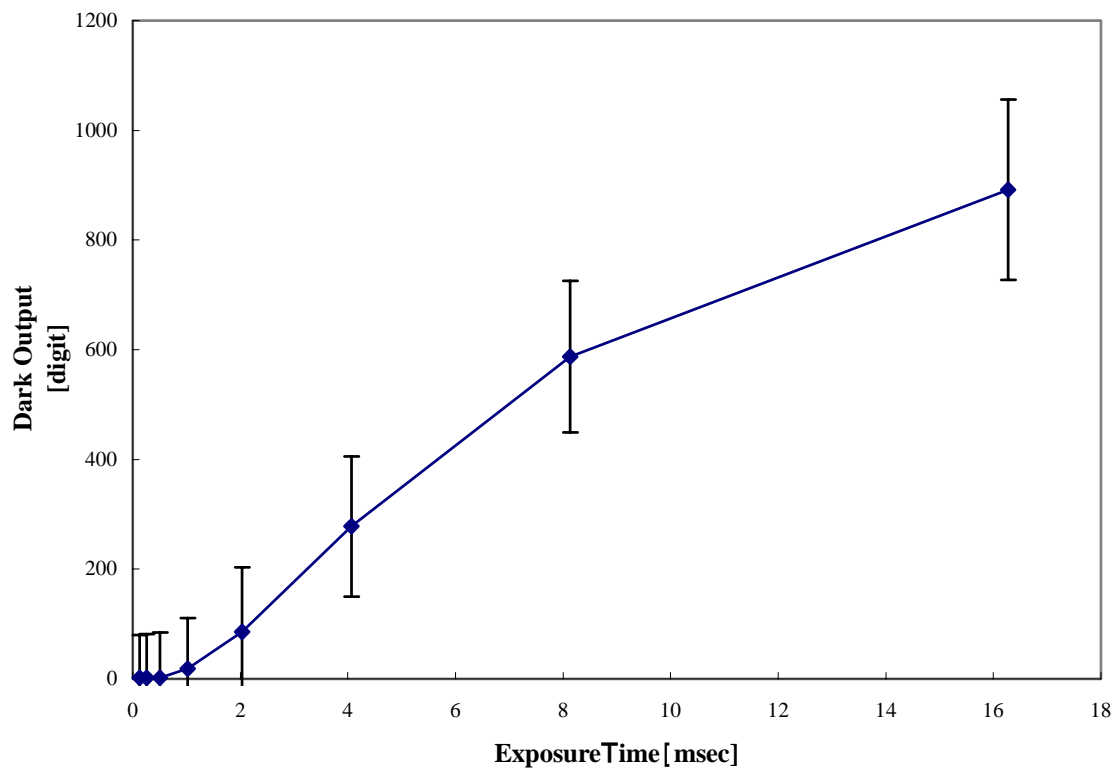


図2-9. 暗電流の時間依存

2-4-3 暗電流直流成分のエリアセンサ内分布

図 2-10 には、露出時間による暗電流成分のエリアセンサ内の分布変化を示す。横方向に暗電流による電荷が増加する傾向があるため、この性質を近似したうえで各ピクセルの特性のばらつきを決めておくことが望ましい。そのため、SW04 において一定の sample 及び line でのダークノイズ値を計測した。

画像の line120 列目のダークノイズ値を見ると画像右側に向けてノイズ値が小さくなる傾向が見られる。この影響で出力に勾配があり、図 2-10. における誤差が大きくなっていると考えられる。

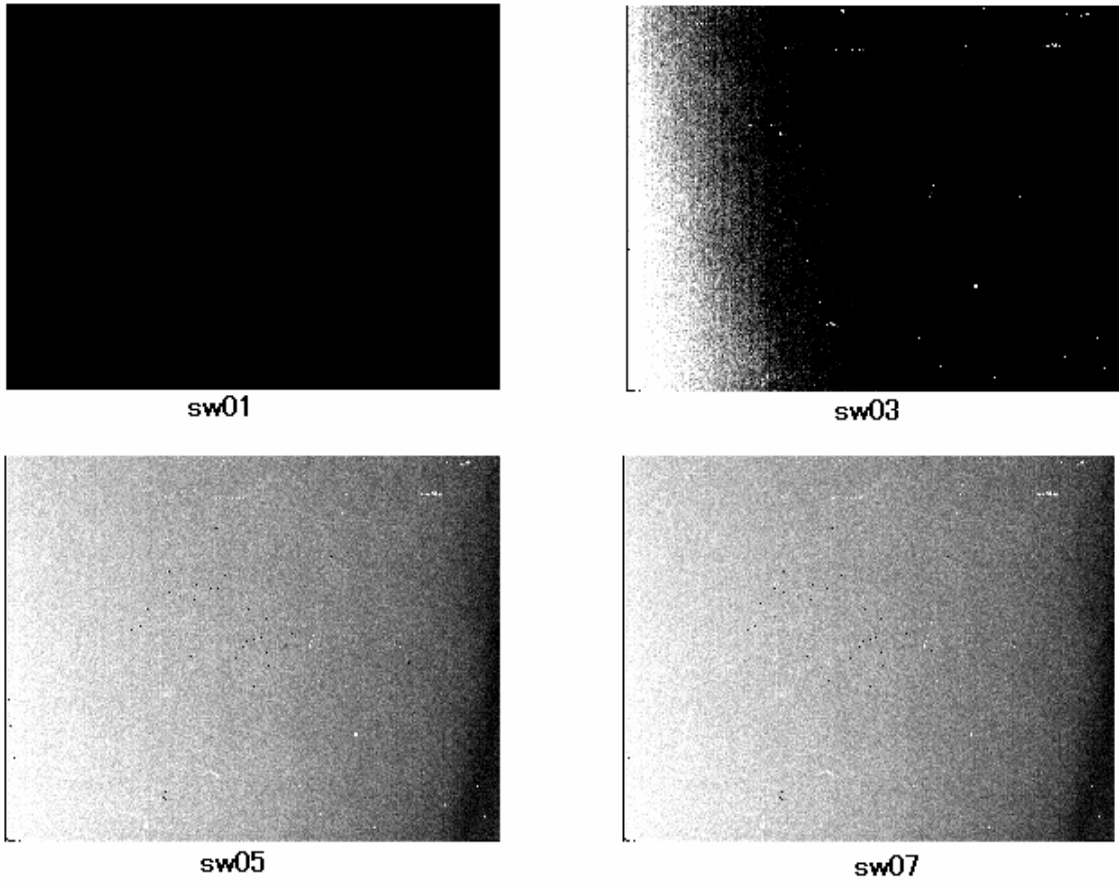


図 2-10. SW01・03・05・07 のダークノイズ

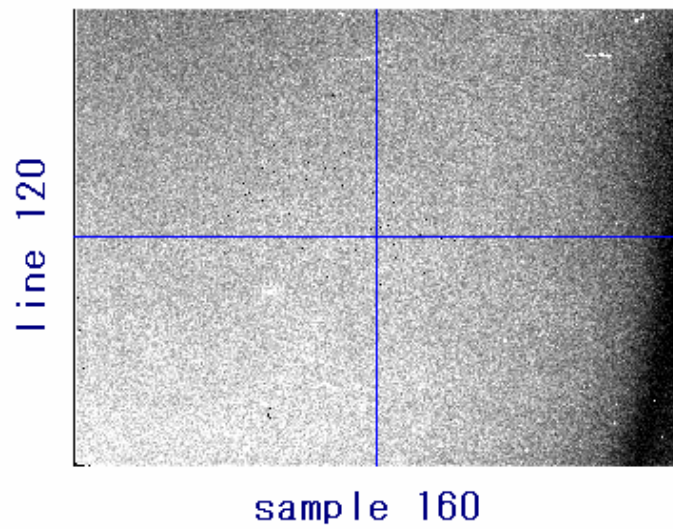


図 2-11. sample160 と line120

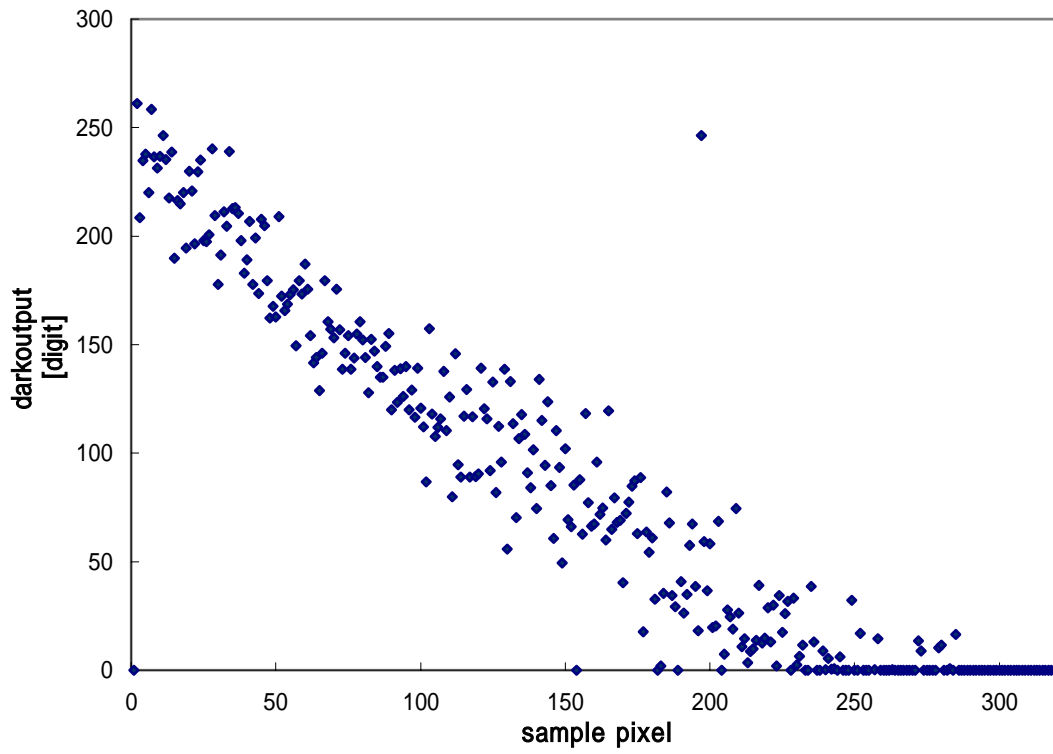


図 2-12. SW04 における line120 行目のピクセルのダークノイズ値

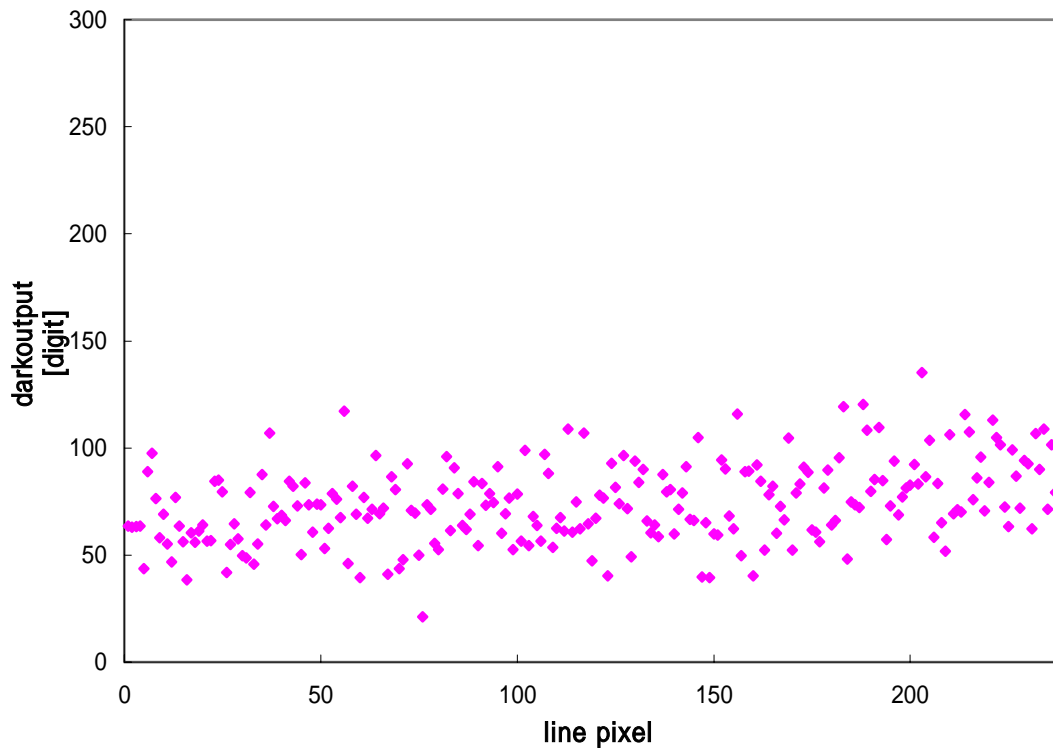


図 2-13. SW04 における sample160 列目のピクセルのダークノイズ値

2-4-4 Dead Pixel 調査

前節で行った暗電流のエリアセンサ内分布調査によると、ノイズの sample1 列目の全ピクセルには、出力が全く見られない dead pixel である。dead pixel はこれらも含めると、全ピクセルの約 0.4% (315/76,800) となり、1 列目を除くと 0.3% となる。dead pixel は画像の中心部にも現れているため、解析の際には注意が必要となる (図 2-13.)。

ノイズの傾向に対して異常な出力値を持つピクセルも確認できる。ダークノイズ平均値の 2 倍を超えるピクセルを調査した結果、全ピクセルの約 0.07% (59/76,800) を占めており、deadpixel と合わせると全ピクセルの約 0.5% が欠陥ピクセルとなり、分析には使用できない。

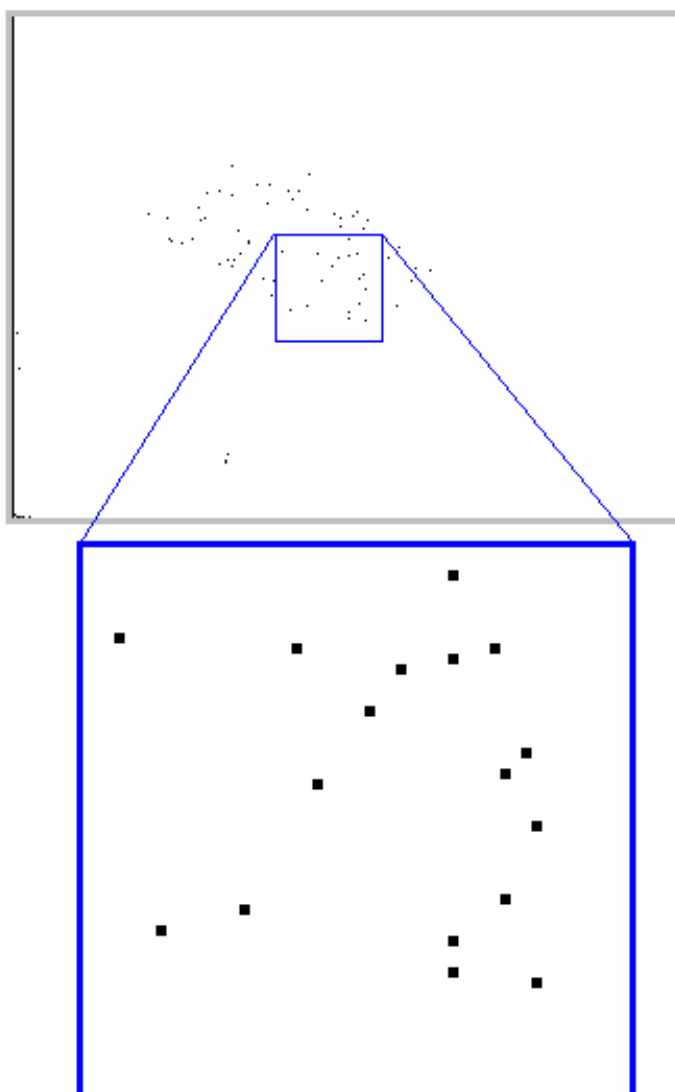


図 2-13. dead pixel の調査

2-4-5 ランダムノイズの測定

一般的に近赤外線センサのダークノイズには、固定パターンノイズとランダム（不規則）ノイズが存在する。暗電流は固定パターン、読み出しノイズはランダムノイズに分類され、固定パターンノイズに関しては校正が可能である。一方ランダムノイズは暗電出力電荷の不規則な発生による揺らぎによって生じるショットノイズ等も含んでいる。このノイズは暗電出力電荷量と共に増加するため、蓄積時間・温度などの動作条件によって変化する。固定パターンノイズの除去を行うと、ランダムノイズは微弱光に対する検出限界、ダイナミックレンジの下限値を決定し、センサはこのノイズよりも小さい信号は検出できない。ダイナミックレンジとは、像の明るさを表現することのできる階調範囲幅のことをいう。

本節ではランダムノイズの測定を行った。このノイズは不規則に変動するため、ダークフレームを連続撮像し、ピクセルごとにダークノイズのゆらぎを測定した。

標準偏差 を求め、それを暗電出力の揺らぎ、ランダムノイズとする。標準偏差は一般的に以下の式で与えられる。

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 / N \quad (\text{式 2-1})$$

それぞれ各ピクセルの*i*番目の撮像で得たデータを x_i [digit]、撮像枚数を*N*[枚]、各ピクセルの平均値を μ [digit]として表している。この値を画面の全ピクセルで加算平均したものを各露出時間でゆらぎの値として計測した。

露出時間に対するランダムノイズの調査結果を図 2-14.に示す。SW05 までは露出時間が増加するにつれて直線的にノイズが増え、SW05 以上ではほぼ一定となり飽和しているように見える。

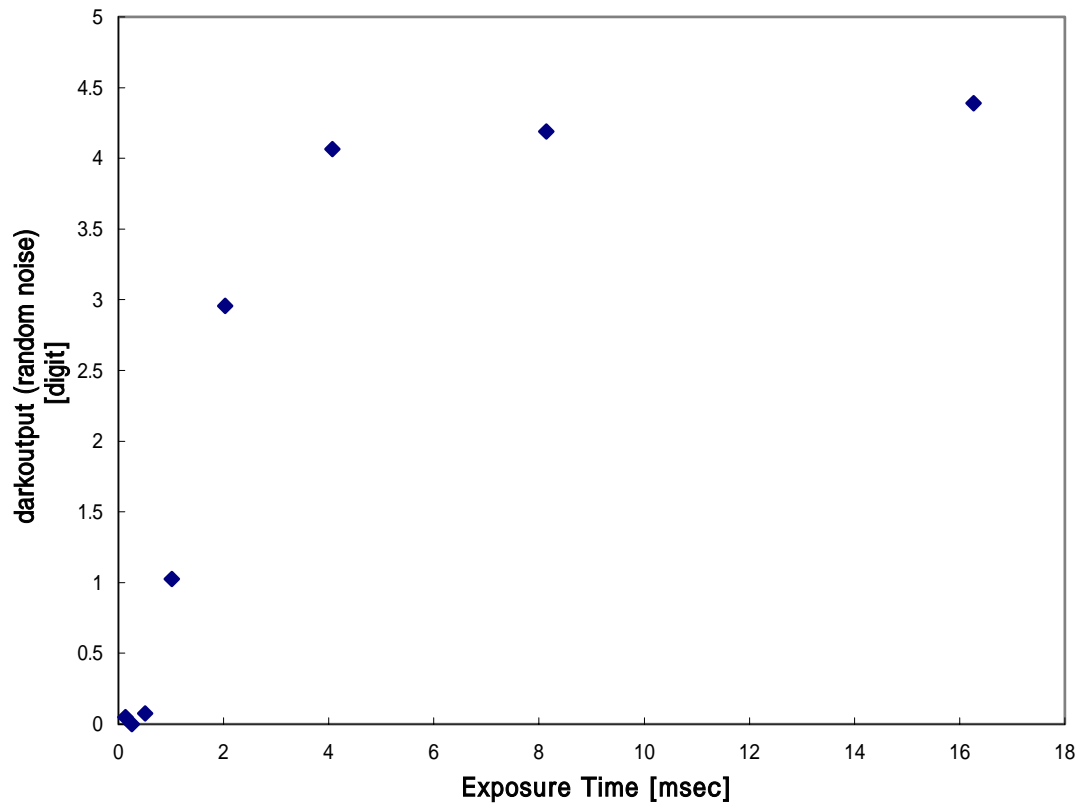


図 2-14. 露出時間に対する標準偏差

2-4-6. 撮像順序による影響調査

前節では、露出時間に対するランダムノイズの調査を行った。次に撮像順番に対するランダムノイズの影響を調査した。実際の撮像では連続して No.0-19 までの計 20 枚の撮像行うため、ほぼ同時に同じ条件下で撮像したと考えられるが、電気信号が発生し始める撮像開始時と、電気信号の終了する最後に撮像した画像に含まれるランダムノイズが異なるはずである。

2002 年 4 月・2003 年 1 月で同じ SW05 のダークノイズを 20 枚連続撮像した。このカメラは温度を一定に保つ機構を持つため、露出時間を同じに設定すれば撮像条件は全く同じはずである。それぞれの画像を 2002/4・2003/1 とし、1～20 枚目の各ピクセルの標準偏差を計測し、それをランダムノイズとして計測した。

全く同じ条件での撮像であるはずなのだが、2002/4 に比べ 2003/1 のノイズ平均値が約 0.1 増えている。これはカメラの劣化による影響や外気温などの諸条件が異なることが理由として考えられる。

しかし、どちらも同様にダークノイズのゆらぎと考えられる波形が不規則ながら見られる。撮像順が後半になるほど振幅が小さくなりながら一定値に近づくように見える。前半の振幅が約 0.05 から約 0.03 と不規則ながらゆらぎは小さくなる傾向があると考えられる。今後はさらに枚数を増やし、この波形がどのように変化するのか調査を重ねる必要があると思われる。

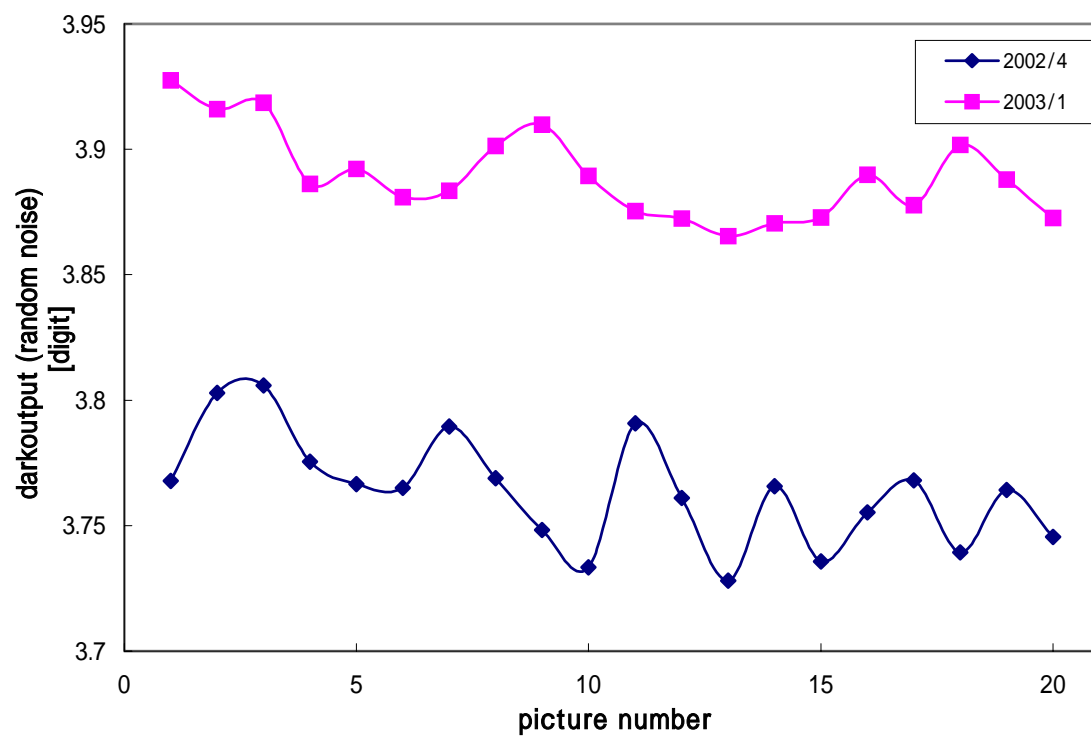


図 2-15 撮像順による標準偏差

2-5. CCDの輝度線形調査

CCDカメラに入射する光子の量は露出時間に比例するため、CCD感度のリニアリティーが成立していればダークノイズを除去した輝度値は露出時間と比例する。これを“リニアリティー特性”と呼ぶ。しかし、実際にはリニアリティー特性が成り立つ輝度値範囲が限られている。ここで、入力側の光量差と出力側の輝度差の割合を で表す。 は図 2-18 のような輝度曲線の勾配として表れる。

分光観測による測光には高精度が必要とされる。そのため、この特性から外れる輝度範囲では誤差が大きくなり使用できないと考えられる。実際のバンドパスフィルタを用いた観測の結果、ダークノイズ除去済みの月面における輝度値の範囲は約 300~2000[*digit*]となる(表 2-3)。この結果からこの輝度範囲でのリニアリティー特性の確認を行う。解析には均一な光量を含むフラットフィールド画像を使用した。

また、この調査のダークノイズ除去段階で SW04 でノイズの方が大きいピクセルが表れた。撮像されたフラットフィールド画像にはダークノイズも含まれており、ダークノイズの除去による負のデータの発生はあり得ないはずである。ダークフレームにおいてノイズが異常に高くなり、ダークノイズ除去により負のデータが表れたと考えられる。そのため、今後の解析においては SW04 以下での撮像画像は使用しない。

【フラットフィールドの撮像】

図 2-16 のように、スクリーンに均一な光を当て、光源を紙で覆い光量を 3 段階に調節し、ST-7 の nosepiece (図) を装着後、光源の光が CCD 面に入らないように連続撮像を行う。

【結果と考察】

各光量で連続撮像した 10 枚のフラットフィールド画像のピクセルごとにダークノイズを除去した後、ピクセルごとに加算平均する。さらに全体 (320×240 ピクセル) の平均輝度値を露出時間ごとに測定した。横軸は露出時間を表し、縦軸は輝度値[*digit*]を示しており、両軸とも対数表示で示してある。

ダークノイズの除去により問題のない SW05 以上の画像における勾配を求めた結果、約 100~2000 という範囲で高いリニアリティーが望めることが判明した。これはこの範囲の輝度値であれば、このカメラの使用が可能であることを示している。



図 2 - 16.フラットフィールド撮影の様子

フィルタ中心波長	SW05	SW06	SW07
晴れの海			
1050	224	420	812
1250	278	528	1079
1550	363	689	1369
デカルト高地			
1050	349	662	1337
1250	418	805	1635
1550	503	967	1950

表 2-3.バンドパスフィルタによる海と高地の輝度値

露出時間 (msec)	光量小[digit]	光量中[digit]	光量大[digit]
0.127	2	0	0
0.254	2	1	3
0.508	6	17	28
1.017	25	77	125
2.034	77	218	283
4.068	136	370	493
8.135	260	739	954
16.27	487	1410	1918

表 2-4. 露出時間に対する輝度値 (ダークノイズ除去済)

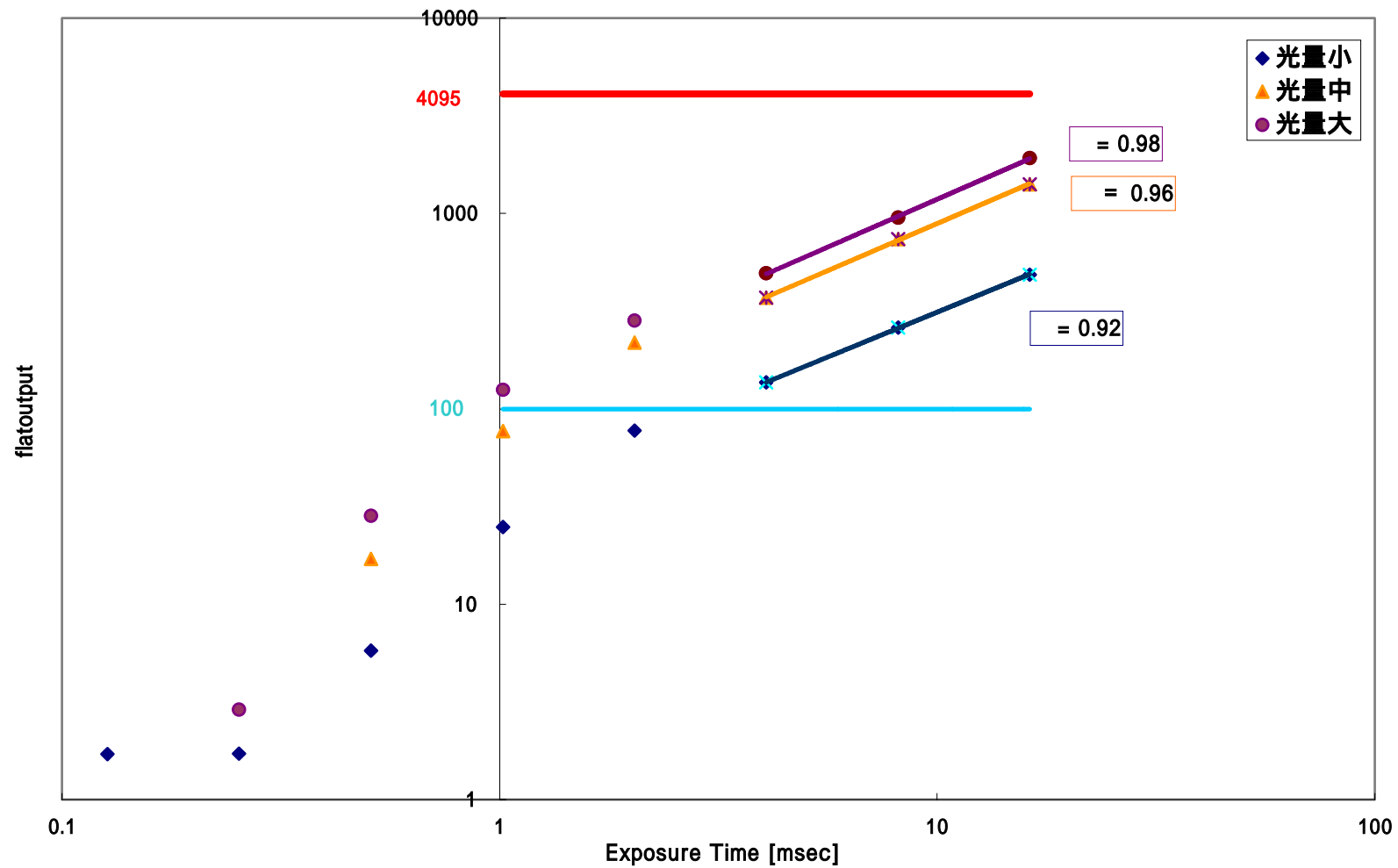


図 2-17. SU320 - 1.7 の輝度特性

第3章 『BJ 41L』の特性評価

本節ではモノクロの可視 CCD カメラ『BJ - 41L』（ビットラン社製）の露出時間に対する輝度値変化の線形調査について論述する。

3-1. 本調査の意義

現段階で使用している可視 CCD カメラは、上述したように SBIG 社の『ST - 7』である。『BJ - 41L』を調査した理由はこのカメラが重量・サイズともにコンパクトなため、開発中の分光撮像システムの搭載が ST - 7 よりも容易になると期待できるためである。望遠鏡赤道儀への荷重負担を減らせ、スペース的にも分光器の設計上で有利であるため特性評価を行うこととした。ただし、ABG 機能がついていることからニアリティ特性に不確実性が残る。

3-2. アンチブルーミング (ABG) 機能について

『BJ - 41L』には露出オーバーを起こした画素から電子信号が他の画素へ漏れ出すのを防止する「アンチブルーミング機能」を備えられている。この機能により、本来 16[bit]で最大輝度値が 65536 になる所が自動的に制御され本来の輝度値よりも小さくなり、光量を正しく測定する事が難しくなってしまう。今後の ABG 機能付の CCD カメラを搭載することを想定しても、分光撮像システム搭載の検討材料として今回の調査を行った。ABG 機能が働いてもニアリティ特性が確認できる範囲が特定できれば、使用も可能であると評価できる。

3-3. 『BJ41 - L』の仕様

『BJ - 41L』(ピットラン社製)のカタログによるカメラスペックを表3-1.に示す。

カメラサイズ	78mm (W) × 110mm (H) × 91.5mm (D)
カメラ重量	重量 約 600[g]
CCD チップ	ICX285AL (ソニー社製)
実行画素数	1360 (H) × 1024 (V) 約 140 万画素
受光面積	8.8 × 6.6 mm
チップサイズ	10.2mm (H) × 8.36mm (V)
ピクセルセルサイズ	6.45 μm (H) × 6.45 μm (V)
アンチブルーミング機能	オンチップアンチブルーミング
冷却方法	空冷又は水冷 1段ペルチェ素子、ファン付
冷却温度	(空冷) 外気温 - 25 (水冷) 水温 - 30
露出時間	0.001 秒, 0.002 秒, 0.004 秒, 0.008 秒 0.01 秒 ~ 0.99 秒 (0.01 秒刻み) 1 秒 ~ 1 時間 (0.1 秒刻み)

表3-1. 『BJ - 41L』のスペック (ピットラン社 カタログより)

このカメラにはSONY社のCCDチップ『ICX285AL』が搭載されている。ピクセル配列は横1360ピクセル・縦1024ピクセルで、合計約140万個のピクセルで1画面を構成するしくみになっている。

このCCDセンサはCCDの温度を操作ソフトによって制御・設定できる仕組みになっている。冷却温度の範囲は表3-1に示す。また、冷却方法にはファンによる空冷と水冷の2つが使用できる。ファンはカメラに付属しているが、水冷の場合水冷装置の装着を必要とする。また、露出時間に関しても操作ソフトによる設定が可能である。設定可能範囲は表に示す通りである。

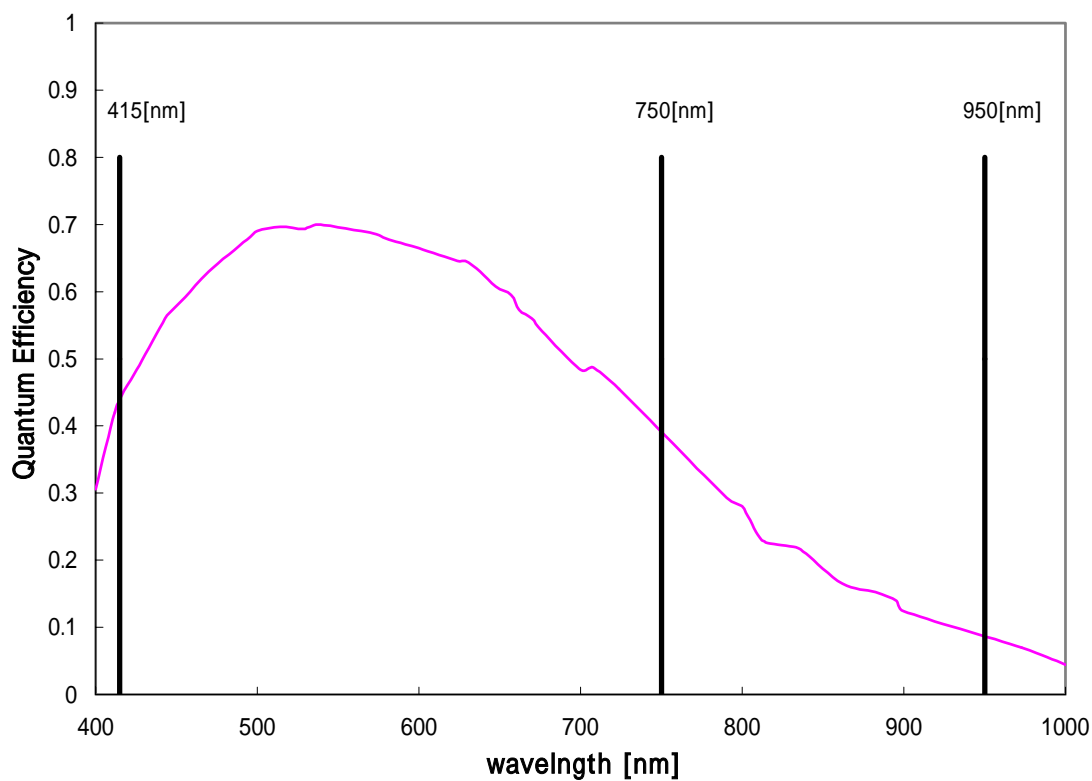
ABG機能に関しては上述した通りであるが、このカメラでは撮像時にチップでこの機能が発動する「オンチップABG」という仕組みになっている。ABG機能付カメラに関してはこの他にも、画像操作ソフト上でABG機能が働くカメラもある。



BJ-41シリーズ寸法図

図 3-1. 『BJ41 - L』のサイズ (ビットラン社ホームページより)

3-4. 『ICX285AL』の分光感度特性



(ビットラン社 カタログより)

図 3-2. 『ICX285AL』の量子化効率

図 3-2 に示したのは、カタログに示されていた相対反射率から導いた量子化効率の値をグラフ化したものである。我々が可視領域で必要とし、フィルタによる分光撮像を行う範囲は 400[nm] ~ 1000[nm]となる。グラフには可視領域撮像でバンドパスフィルターの波長も同時に示した。

3-5. CCDの輝度値線形調査

近赤外カメラ同様フラットフィールド画像を撮像し『SU320-1.7』同様、輝度値線形の解析を行った。撮像はビットランのカメラ操作ソフト『Astronomical CCD Camera』（図 3-3）、解析にはENVIを用いた。

解析は、近赤外領域の調査同様、露出時間に対する各画像の全画面での平均輝度値を測定し、標準偏差には画像の全画面における各画素の感度差を使用した。

3-5-1. フラットフィールドの撮像

『BJ - 41L』に直接レンズを着用し、光源を紙で覆い光量を3段階に調節して撮像を行った。また、その際レンズに直接光が当たらないよう図 3-3.のようにカメラと光源の間についてを設置した。

露出時間の誤差を考慮し、0.1秒露出から開始した。CCD温度は $-6.3 (\pm 0.3)$ に設定した。ただし各光量での輝度値のリニアリティが確認できる範囲が異なるため、光量によっては輝度値の測定してない露出時間もある。測定したデータを対数表示で累乗近似式とともにグラフに示す。

またカメラの操作ソフトにより、各露出時間でライトフレーム撮像の直前にダーク画像を自動的に4枚撮像、さらにその4枚を加算平均したものを使用してライトフレーム撮像の都度ダーク処理を施した。画像は16 [bit]でコントロールソフトのオリジナル画像形式(.CCD)で保存した。

ABG機能により、輝度値が60000前後(max 65535)になると蓄積電荷が抑えられ始める傾向がみられる。実際の数値に関してもデータの飽和値である65535に達するまでは長い露出時間(光量)が必要となることがわかる。しかしながら、光量がABG機能の働かない約50000[digit]までは線系になることが期待できる。

『SU320-1.7』同様勾配が1に最も近づく輝度値が約9000~約50000の範囲で高いリニアリティが望める。逆に輝度値50000を超えてから、ABG機能の影響がでるようである。

この結果よりABG機能が作用しない範囲内であれば、リニアリティは望めることがわかった。特に、輝度値が10000周辺になると高いリニアリティが得られ、分光器への搭載は十分可能だと考えられる。図3-6より輝度値が9000~50000の範囲であればリニアリティは確保できる。

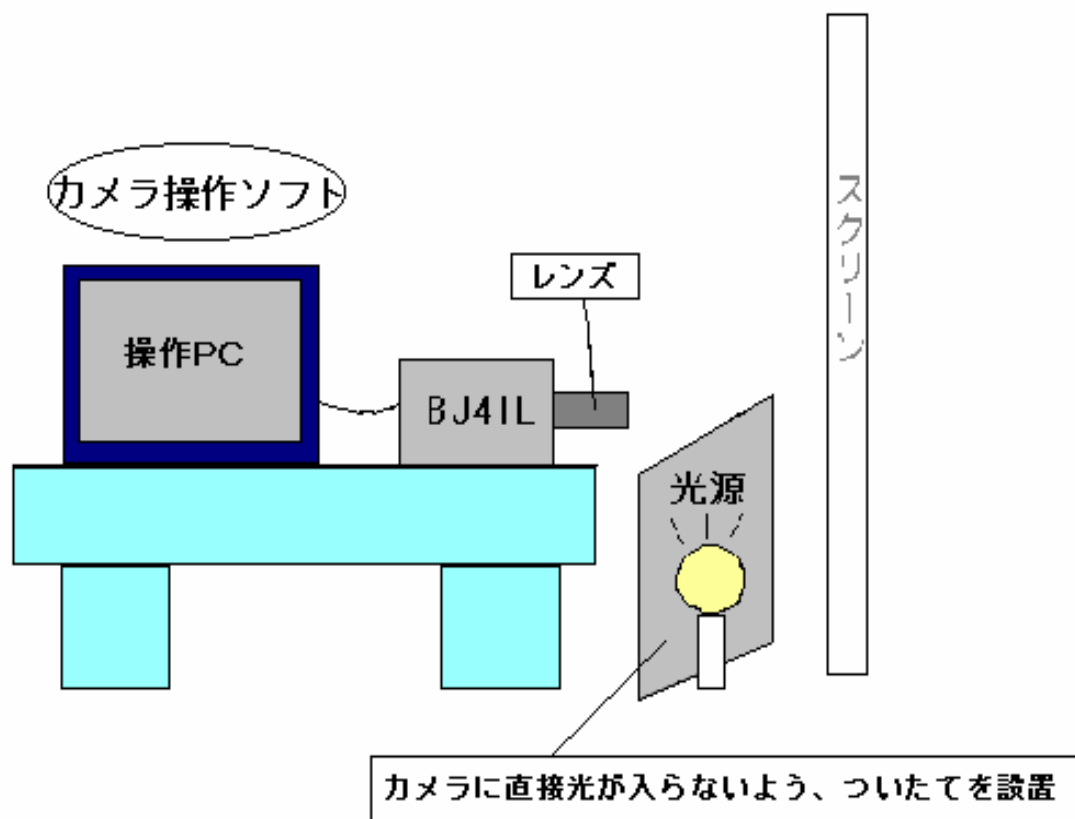


図 3-3. BJ - 41L のフラットフィールド画像撮像

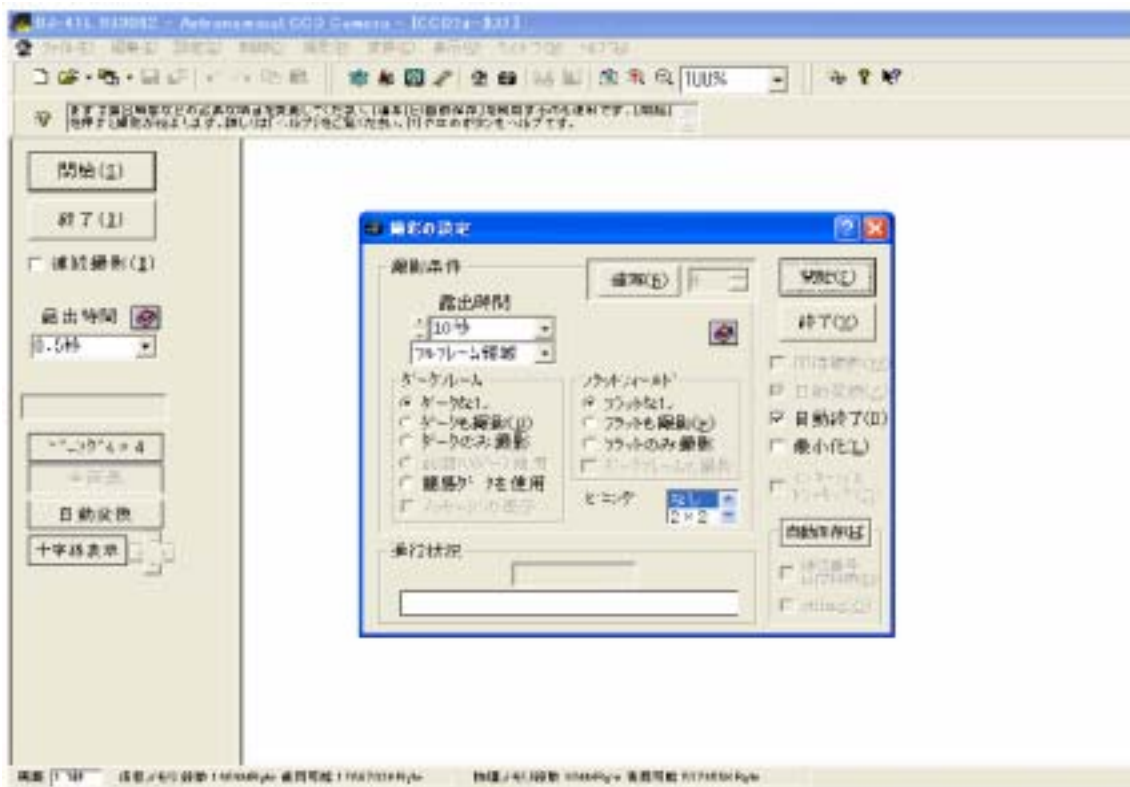


図 3-4. 『BJ - 41L』操作ソフト『AstronomiCaL CCD Camera』



ライトフィールド (ダーク処理済)



ダークノイズ (4枚自動加算平均)

図 3-5. 実際の撮像画像

露出時間(S)	光量小[digit]		光量中[digit]		光量大[digit]	
	mean	stdev	mean	stdev	mean	stdev
0.1	2001	224	5763	1252	8884	1867
0.2	3208	431	10278	2365	16557	3596
0.3	4456	644	15608	3678	24075	5293
0.4	5620	842	20604	4913	32498	7188
0.5	6797	1045	25549	6126	41779	9253
0.6	7888	1232	30575	7356	48586	10408
0.7	9068	1432	36650	8803	53025	10136
0.8	10365	1656	40989	9841	58689	8345
0.9	11667	1880	46560	10918	61451	6646
1	12757	2065	51100	10878	63499	4547
1.5					65532	64
2	24728	4119	65204	1591	65535	0
2.5			65530	107	65535	0
3			65535	3		
3.5			65535	3		
5	58122	7518				
10	65519	135				
15	65522	121				
20	65523	114				

表 3-1. 一定光量を入射した際の露出時間の違いによる輝度値変化
(ダークノイズ除去済)

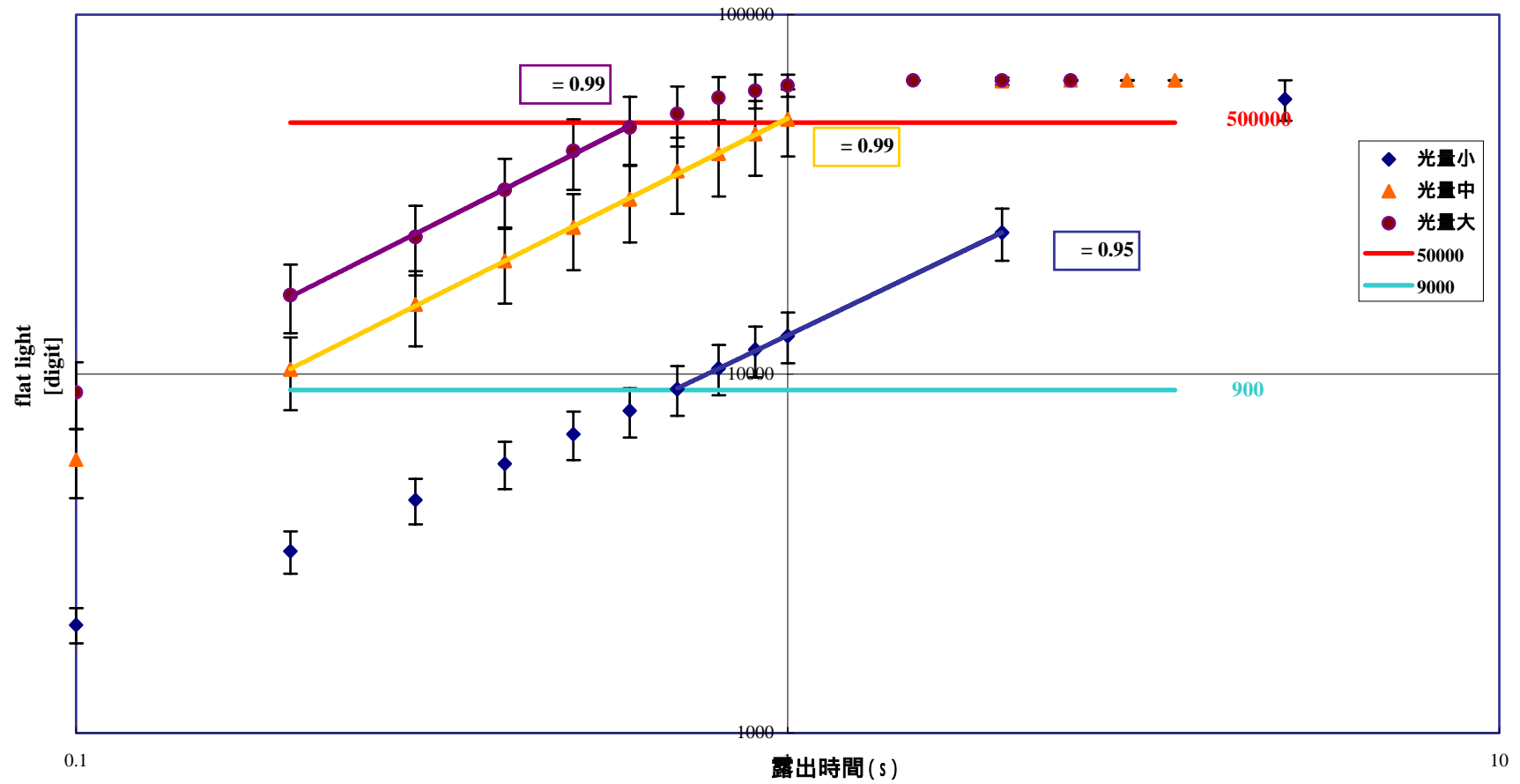


図 3-6. 一定光量を入射した際の露出時間の違いによる輝度値変化 (ダークノイズ除去済)

第4章 連続分光撮像システムの構築

本節では、分光器の理論設計を実施して、天体望遠鏡，可視・近赤外線 CCD センサー，連続分光器の各システム要件から統合システム設計を実施した。

4-1 . 分光器

分光器は天体の光を波長別に分け、スペクトルを観測するための装置である。一般的な分光器の簡略図を図 4-1. で示す。また他のシステム要件から、本研究で必要とする連続分光器本体各部の理論設計を行う。

4-1-1 波長分解能

分光された波長 (λ_0) の像は点でなく、広がりをもっている。従って、波長の違いが小さくなると、波長が重なりあい波長の区別が不可能になる。これは λ_0 の周りのある波長範囲 ($\Delta\lambda$) 以内の波長は異なる波長として区別できなくなることを意味している。どれだけ細かい波長範囲が区別できるかを示したのが波長分解能 (R) で以下の式で定義される。

$$R = \lambda_0 / \Delta\lambda \quad (\text{式 4-1})$$

ここで、我々が必要とする分解能を考える。我々は中心波長 1000[nm] において、10[nm] まで区別したい。よってこれを分解能の定義式に入れて考える

$$R = 1000[\text{nm}] / 10[\text{nm}] = 100$$

よって我々が必要とするのは、分解能が 100 の分光器である。

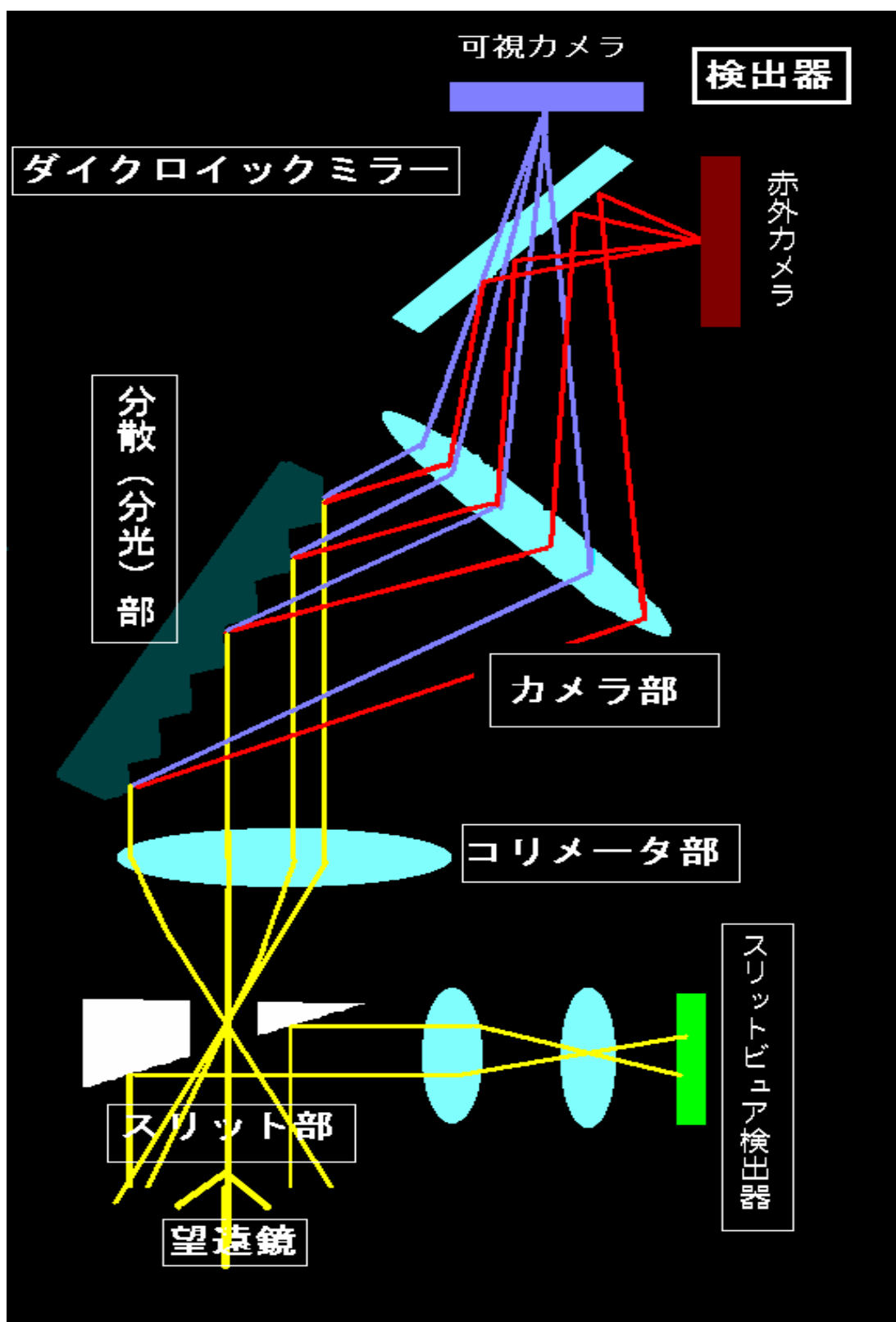


図 4-1. 分光器の簡略図

4-1-2 スリット幅

スリット幅は分光器の分解能・分光器に入射する光量を決定する。本研究で必要とする空間分解能は、近赤外領域 CCD カメラにおいて 1 ピクセルに 10[nm]の波長分解能を必要としている。また、スリット幅は 2 ピクセルに像が入るように設計する。近赤外領域 CCD カメラにおいて空間解像度の検討等を行う場合は、Pitch の値が有効サイズとなる。Pitch サイズは 40[μm]なので、スリット幅は 80[μm]となる。

4-2.使用天体望遠鏡の適正 F 値検討

望遠鏡の F 値とは焦点距離を口径で割った数値のことである。この値が小さいほど望遠鏡に入射する光量は多くなる。また、検出器によって撮像される画像の視野角・S/N 比も F 値によって左右されるため、本研究に適切な F 値に補正する必要がある。しかし、使用する望遠鏡の口径は 300mm と決定しているため、天体望遠鏡の焦点距離を補正系レンズによって適正に補正する必要がある。本節では連続分光撮像システムに有効な F 値を理論設計した。

表 4-1 は、F 値による近赤外領域 CCD カメラ及び可視領域 CCD カメラの解像度・S/N 比を見積もったものである。

解像度は、近赤外領域 CCD カメラにおいて月面における海が、一度の撮像で入ることを基準とし、S/N 比は適切な解像度を得られる画像を重ねて向上させる。この 2 点を考慮して F 値を決定する。

月面の視直径が約 31' 05" であるとする、1 つの海の視野角は約 15' あれば一つの画面に入れて撮像することができるので、そこから F 値の許容範囲を考えると、10 以上が望ましいただし撮像領域が広すぎても、月面解像度が低くなるため解析には使えなくなってしまう。そう考えると、F 値は約 10~5 の範囲内に補正することが望ましい。

次に S/N 比を考慮する。F 値が小さくなるほど S/N 比は向上する。しかし F 値が 10 の時で S/N 比は 5 と低い数値になってしまう。画像を重ねることによって S/N 比を上げることはできるが、あまりに値が低すぎると重ねる画像の枚数が膨大になってしまう。そのため、最低でも S/N 比約 10 が得られる F 値は最大 7 前後と決定できる。

以上 2 点を考慮すると、F 値の適正範囲は、7 ~ 5 と決める。

月面解像度(視直径を 31'05" とする)

赤外カメラ 2pix で受光				VIS での pix 数	赤外カメラ	可視カメラ	赤外カメラ		可視カメラ		
km/2pix	arcsec("/2pix)	f [mm]	F 値	個	950nm S/N 値	950nm S/N 値	水平視野(H)	垂直視野(V)	(" /pix)	(H)	(V)
2	1.1	15238	50.8	8.9	0	4	2'50"	2'10"	0.1	1'30"	1'00"
3	1.6	10159	33.9	8.9	0	8	5'00"	3'10"	0.2	2'20"	1'30"
4	2.2	7619	25.4	8.9	1	13	5'50"	4'20"	0.2	3'00"	2'00"
6	3.2	5079	16.9	8.9	2	22	8'40"	6'30"	0.4	4'40"	3'00"
8	4.3	3810	12.7	8.9	3	32	11'30"	8'40"	0.5	6'10"	4'00"
10	5.4	3048	10.2	8.9	5	41	14'20"	10'50"	0.6	7'50"	5'10"
15	8.1	2032	6.8	8.9	11	65	21'40"	16'10"	0.9	11'40"	7'50"
20	10.8	1524	5.1	8.9	20	88	28'50"	21'40"	1.2	15'30"	10'20"
30	16.2	1016	3.4	8.9	45	133	43'10"	32'20"	1.8	23'20"	15'30"
40	21.6	762	2.5	8.9	77	178	57'40"	43'10"	2.4	31'00"	20'40"
50	27.0	610	2.0	8.9	118	223	72'00"	54'00"	3.0	38'50"	25'50"
60	32.4	508	1.7	8.9	164	268	86'20"	64'50"	3.6	46'30"	31'00"

表 4-1 . F 値による解像度・S/N 比

第5章 まとめ

分光器に搭載する近赤外カメラには、InGaAs センサを採用する。露出時間が最も長い SW07(16.27[msec])でもノイズの DN 値は平均約 940[*digit*]と飽和容量の約 23%を占めるのみである。ただし SW00 露出時間での撮像は分析には使用できないと言える。また、SW04 までの露出時間では、ノイズが大きくなってしまい解析には使用できないため、SW05 ~ SW07 の露出時間で撮像する。

ダークノイズ平均値の 2 倍を超えるピクセルを調査した結果、全ピクセルの約 0.07% (59/76,800) を占めており、deadpixel と合わせると全ピクセルの約 0.5%が欠陥ピクセルとなり、分析には使用できない。

約 100 ~ 2000 の範囲の輝度値であれば、このカメラの使用が可能である。

ABG 機能を備えたカメラでも、機能が作用しない範囲内であれば、リニアリティは望める。『BJ-41L』では輝度値が 9000 ~ 50000 の範囲であればリニアリティは確保できる。

分光撮像システム搭載の望遠鏡 F 値の適正範囲は、S/N 比と月面解像度を考慮して 7 ~ 5 の範囲のものと決める。

謝辞

本卒業論文の研究を行うに当たり、大変ご丁寧なご指導をいただいた宮城教育大学教育学部理科教育専攻（地学科）の高田淑子助教授に深く感謝いたします。東北大学大学院博士課程の平尾直久さん、株式会社ジェネシアの池田優二さんに多くのご指導をいただいたことに深く感謝もうしあげます。

同室の松下真人さん、吉田和剛君、千葉紀子さん、林美香さんに深く感謝いたします。

引用文献

- 福島秀雄（1996）『天文アマチュアのための冷却 CCD 入門』
- 平尾直久（2001）『水星探査機用 可視・近赤外分光撮像装置の基礎開発』
- 隅山智子（2001）『可視近赤外分光観測による月面組成分布の調査』
- 松下真人（2002）『月面分光撮像システムの構築及び画像解析による月面表層物質の組成分布調査』
- 池田優二（2001）『分光について』

