

修士論文

月面連続分光撮像システムの構築ならびに
月面表層鉱物組成分布マップの作成

宮城教育大学大学院教育学研究科(修士課程)

教科教育専攻・理科教育専修

02075 松下真人

論文要旨

地球唯一の衛星である月は、地球上からの望遠鏡観測、軌道上からの観測、さらに旧ソ連の Luna 計画(1959~76) やアメリカの Apollo 計画(1967~72)における月面表層の岩石試料採取など、さまざまな方法での探査が行われてきた。近年では、1994 年の Clementine 探査機、1998 年の Lunar Prospector 探査機が打ち上げられた。日本でも、月探査計画が宇宙航空研究開発機構(JAXA)により進められている。この計画は SELENE 計画と呼ばれ、月の起源と進化を探り、さらに月資源の利用可能性を調査し、月探査を進める上で必要な探査技術を得ることを目的としている。SELENE 探査機には、蛍光 X 線分光計、 γ 線分光計、マルチバンドイメージャ、スペクトルプロファイラなどの観測機器が搭載され、月面表層環境が次第に明らかになると期待される。

月岩石に限らず、岩石を構成する鉱物は太陽光の特定の波長域を吸収し、それ以外の光を反射する。特に、かんらん石、単斜輝石、斜方輝石のような有色鉱物は、それらの鉱物中に存在する Fe^{2+} が可視・近赤外領域の光を吸収することで、反射スペクトルに吸収帯が生じる。その吸収帯の特徴は各々の鉱物によって異なり、太陽光の反射スペクトルを観測することで鉱物の同定が可能となる。このように、月の海の鉱物組成を知ることは、溶岩分布とそのマグマの起源との関係といった月表層の進化過程を明らかにする上で重要である。

本研究では、月の表側の海を構成する溶岩の鉱物組成分布を調査するための月面連続分光撮像システムの構築を目的としている。このシステムは、地上の望遠鏡と分光器、CCD カメラからなり、連続スペクトルの取得とイメージングを同時に行うことが可能となる。これまで、地上の望遠鏡を用いたフィルター分光観測が行われてきたが、フィルター分光観測では一枚のフィルターにつき一つの波長帯についてのイメージングしかできないため、連続スペクトルデータを得るには中心波長の異なる狭帯域フィルターを数十枚も用意しなければならない。また、月の位相を一致させることを考慮すると一晩での観測が望ましく、それらの撮像データは膨大なものとなる。

そこで、本研究では月の海の構成鉱物に見られる 950 nm 付近の吸収帯について詳細なスペクトルデータを得られるように、また、波長 600 nm から 1600 nm までの連続スペクトルの取得とイメージングを同時に行えるように、月面連続分光撮像システムを構築する。しかし、600 nm から 1600 nm という広範囲にわたって感度を持つ CCD センサは存在しないため、可視・近赤外領域と近赤外領域で異なる CCD センサを用いる。そのため、各センサの性能を考慮した上でのシステム構築が不可欠である。そこで、可視・近赤外線カメラと近赤外線カメラの両方でテスト撮像を行い、補正系レンズ設計、分光系の設計、スリットビューアのレンズ設計を実施した。また、これらの設計データをもとにシステム全体での SN を見積もった。

目次

論文要旨

1. 序論

1-1. はじめに

1-1-1. 月の科学

1-1-2. 月面探査

1-1-3. 月岩石・鉱物のスペクトル特性

1-2. 研究目的

2. CCD カメラの特性

2-1. Si-CCD カメラ

2-1-1. 可視・近赤外線カメラ ST-7E の仕様

2-1-2. Si-CCD エリアセンサ KAF-0401E の量子効率と分光感度

2-2. InGaAs-CCD カメラ

2-2-1. 近赤外線カメラ SU320-1.7RT-D の仕様

2-2-2. InGaAs-CCD エリアセンサ SU320-1.7T1 の量子効率と分光感度

3. 連続分光撮像システムの構築

3-1. 望遠鏡の選択

3-2. 分光器の設計

3-2-1. 補正系 F 値の決定

3-2-2. ダイクロイックミラーの仕様

3-2-3. スリットビューアの選択

4. まとめ

4-1. SN 見積もり

参考文献

謝辞

1. 序論

1-1. はじめに

1-1-1. 月の科学

月は地球唯一の衛星であり、赤道半径が 1738 km、質量 7.349×10^{22} kg で、地球から平均 38 万 4400 km の距離を公転している (Table 1-1). 平均密度は 3.35 g/cm^3 で、地球 (5.52 g/cm^3) や金星 (5.24 g/cm^3) よりも小さく、その結果、地球型惑星に見られるような核は存在しないと考えられている。また、表面には高地と海の 2 つの代表的な地質単位があり (Figure 1-1), 高地は地形的に海よりも高度が高く、隕石衝突によってできたクレーターが密集するアルベド(反射能)の高い明るい地域である。高地はカルシウム、アルミニウムに富む斜長岩から構成されており、大部分は隕石の衝突により破碎混合された角礫岩の組織を示す。これに対し、海は高地と比較して低く平坦でアルベドが低く、クレーターの数も少ない。ほとんどの海は円形状で、月地殻が形成された直後、巨大天体が衝突し形成された盆地内に溶岩が流出して形成されたと考えられている。衝突の影響は月全面に及んだものと思われ、月高地の堆積物もこのような巨大な衝突クレーターの放出堆積物と考えられている。溶岩は鉄およびマグネシウムに富む粘性の低い玄武岩であるが、地域や噴出年代によりチタンの含有量の異なるいくつかの溶岩流が知られている。月の溶岩は非常に流動性に富み、その容積と流れの規模は非常に大きく、爆発性の火山地形を示さないという特徴がある。月の溶岩の流出形態とその堆積物は、地球上の玄武岩質溶岩流に類似している [武田, 1984]。月の海の溶岩流は、大きな多重リングをもつ円形の盆地の部分や、多重リングの間のくぼみを満たすもの、不規則な形の低地に流出したもの、高地のわずかにくぼみやクレーターの底を満たしたものなどがある。月面探査、および月面サンプルの解析により月面上の各地域での溶岩流の広がりや厚さ、岩石タイプ、重なり順序が決定されている。

月表層を形成するもっとも新しい地質単位はレゴリスとよばれる表土で、隕石鋳物の破砕片とガラスおよび溶結土とよばれるものからなる。真空に近い宇宙環境に直接さらされているため、宇宙線や太陽風の影響で風化が進んでいる。

1-1-2. 月面探査

月に関する情報は、地球からの望遠鏡による観測に始まり、月探査機による写真観測により得られてきた。旧ソビエト連邦の Luna 計画 (1959-1976) では、月の裏側の撮影に成功し、さらに Luna 16 号、20 号、24 号では、月面軟着陸後、月の岩石や土壌を地球へ持ち帰る「サンプル・リターン」を行った。アメリカの Ranger 計画 (1961-1965) では、月面に直接衝突させ

る軌道をとり、月面に達するまで写真を撮影する方法で地上観測に比べてはるかに高解像度の画像を得ることができた。1966-1967年の Lunar Orbiter 計画(アメリカ)では、月周回軌道上から月面を観察・撮影することを主な目的とし、月面の高解像度撮影、月面の測量などが行われた。アポロ計画の有人月面着陸の遂行に必要な科学的・技術的情報を得る目的で実施された Surveyor 計画(1966-1968)では、月面土壌の科学調査(強度・組成・成分・化学分析)をするための機器類が搭載された。1967-1972年の Appolo 計画では、直接人類による探査を行うことができるようになった。

月の形成過程を理解するには、月表面の元素組成分布や存在量を知ることが重要である。これまでに地上からの望遠鏡を使った観測や、探査機が採取したサンプルの分析などがなされてきた[Pieters, 1986]。地上の望遠鏡による観測からは、月の表側について多くの連続したスペクトルデータを得ることができる。また、採取された月のサンプルからは、化学組成などの詳細な情報を得られる。しかし、地上からの望遠鏡観測では、空間分解能は数 km 程度しかない。また、実際に岩石が採取された地点は限られており、月全体について調べることはできない。1994年にアメリカが打ち上げた Clementine 探査機は、紫外光から赤外光までのいくつかの波長で月の裏側を含めた月全体の画像データを取得した(Figure 1-2)。これらのデータは、地上からの望遠鏡観測のデータと比べてはるかに解像度が高く、大気の影響などもないため精度が高い。Clementine で得られたデータを解析することで、月面の $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ の分布が明らかになった[Lucrey et al., 1995, 1998]。Clementine のレーダー観測では、月の南極域のクレーターの底に氷が存在する可能性を示すデータを得た。この確認のため、1998年に Lunar Prospector 探査機が打ち上げられ、中性子分光観測結果より、月の両極付近に氷が存在する可能性が高いことが示された。また、磁場や月の内部構造についても新たな見解が得られた。Lunar Prospector は 1999年7月31日に、衛星自身を極地域に衝突させ、その際に飛散した物質を観測することで氷の存在を明らかにしようとしたが、この観測結果から氷の存在に関わるデータは得られていない。日本でも、月探査計画が宇宙航空研究開発機構(JAXA)により進められている。この計画は SELENE 計画と呼ばれ、月の起源と進化を探り、さらに月資源の利用可能性を調査し、月探査を進める上で必要な探査技術を得ることを目的としている。SELENE 探査機には、蛍光 X 線分光計、γ線分光計、マルチバンドイメージャ、スペクトルプロファイラなどの観測機器が搭載される。

1-1-3. 月岩石・鉱物のスペクトル特性

月岩石に限らず、岩石を構成する鉱物は太陽光の特定の波長域を吸収し、それ以外の光を反射する。特に、かんらん石(Olivine)、単斜輝石(Clinopyroxene)、斜方輝石(Orthopyroxene)のような有色鉱物は、それらの鉱物中に存在する Fe^{2+} が可視・近赤外領域の光を吸収することで、反射スペクトルに吸収帯が生じる。その吸収帯の特徴は各々の鉱物によって異なり、

太陽光の反射スペクトルを観測することで鉱物の同定が可能となる。月岩石サンプル中の斜長石(Plagioclase), かんらん石, 単斜輝石, 斜方輝石の反射スペクトルを示す(Figure 1-3)。しかし, 実際の月表層では宇宙風化作用の程度が異なること, 複数の鉱物が様々な量比で含まれていること, 表層を覆うレゴリスの粒子サイズ異なること, などの要因で反射スペクトルの吸収帯の中心波長や深さ, 幅などが変化する(Figure 1-4)。これらの要因と反射スペクトルの相関関係について, 月岩石サンプルや隕石, 様々な鉱物を用いた研究が行われており, 定量的な扱いが可能となりつつある[Lucey et al., 1995; Blewett et al., 1997; Lucey et al., 1998; Lucey et al., 2000]。

1-2. 研究目的

本研究では, 月の表側の海を構成する溶岩の鉱物組成分布を調査するための月面連続分光撮像システムの構築を目的としている。月の海の鉱物組成を知ることは, 溶岩分布とそのマグマの起源との関係といった月表層の進化過程を明らかにする上で重要である。溶岩を構成する各々の鉱物は, 異なる反射スペクトルを示すため(Figure 1-3), 月の海の連続分光観測を行うことで月表層進化過程についての理解を深めることができる。

これまで, 地上の望遠鏡を用いたフィルター分光観測が行われてきた[McCord et al., 1972; McCord et al., 1976; McCord et al., 1979; Pieters, 1978; McCord et al., 1981; Pieters, 1982; Bell and Hawke, 1984; Lucey et al., 1986; Smrekar and Pieters, 1985]。しかし, フィルター分光観測では一枚のフィルターにつき一つの波長帯についてのイメージングしかできないため, 連続スペクトルデータを得るには中心波長の異なる狭帯域フィルターを数十枚も用意しなければならない。また, 月の位相を一致させることを考慮すると一晩での観測が望ましく, それらの撮像データは膨大なものとなる。

本研究で構築するシステムは, 月の海の構成鉱物に見られる 950 nm 付近の吸収帯について詳細なスペクトルデータを得られるように設計し, 波長 600 nm から 1600 nm までの連続スペクトルの取得とイメージングを同時に行うことが可能となる。しかし, 本研究では, 可視・近赤外領域と近赤外領域で異なる CCD センサを用いるため, 各センサの性能を考慮した上でのシステム構築が不可欠である。

そこで, 可視・近赤外線カメラと近赤外線カメラの両方でテスト撮像を行い, 補正系レンズ設計, 分光系の設計, スリットビューアのレンズ設計を実施した。また, これらの設計データをもとにシステム全体での SN を見積もった。

Table 1-1 (a)月と地球の大きさの比較 [National Space Science Data Center]

Bulk parameters		Moon	Earth	Ratio (Moon/Earth)
Mass	(10^{24} kg)	0.07349	5.9736	0.0123
Volume	(10^{10} km ³)	2.1958	108.321	0.0203
Equatorial radius	(km)		6378.1	0.2725
Polar radius	(km)	1736	6356.8	0.2731
Volumetric mean radius	(km)	1737.1	6371	0.2727
Ellipticity	(Flattening)	0.0012	0.00335	0.36
Mean density	(kg/m ³)	3350	5515	0.607
Surface gravity	(m/s ²)	1.62	9.8	0.165
Surface acceleration	(m/s ²)	1.62	9.78	0.166
Escape velocity	(km/s)	2.38	11.2	0.213
GM	(10^6 km ³ /s ²)	0.0049	0.3986	0.0123
Bond albedo		0.11	0.306	0.36
Visual geometric albedo		0.12	0.367	0.33
Visual magnitude V	(1,0)	0.21	-3.86	-
Solar irradiance	(W/m ²)	1367.6	1367.6	1
Black-body temperature	(K)	274.5	254.3	1.079
Topographic range	(km)	16	20	0.8
Moment of Inertia	(I/MR ²)	0.394	0.3308	1.191
J2	(10^{-6})	202.7	1082.63	0.187

Table 1-1 (b)月の公転軌道データ

Orbital parameters (for orbit about the Earth)		Moon
Semimajor axis	(10 ⁶ km)	0.3844
Perigee	(10 ⁶ km)	0.3633
Apogee	(10 ⁶ km)	0.4055
Revolution period	(days)	27.3217
Synodic period	(days)	29.53
Mean orbital velocity	(km/s)	1.023
Max. orbital velocity	(km/s)	1.076
Min. orbital velocity	(km/s)	0.964
Inclination to ecliptic	(deg)	5.145
Inclination to equator	(deg)	18.28 - 28.58
Orbit eccentricity		0.0549
Sidereal rotation period	(hrs)	655.728
Obliquity to orbit	(deg)	6.68
Recession rate from Earth	(cm/yr)	3.8
Mean values at opposition from Earth		
Distance from Earth	(km)	384,467
Apparent diameter	(seconds of arc)	1864.2
Apparent visual magnitude		-12.74



(a)



(b)

Figure 1-1 (a)月面画像. 明るい部分が高地, 円形状の暗い部分が海(2001年11月02日撮像).
(b)雨の海とコペルニクス・クレーター(上部中央)[National Space Science Data Center]

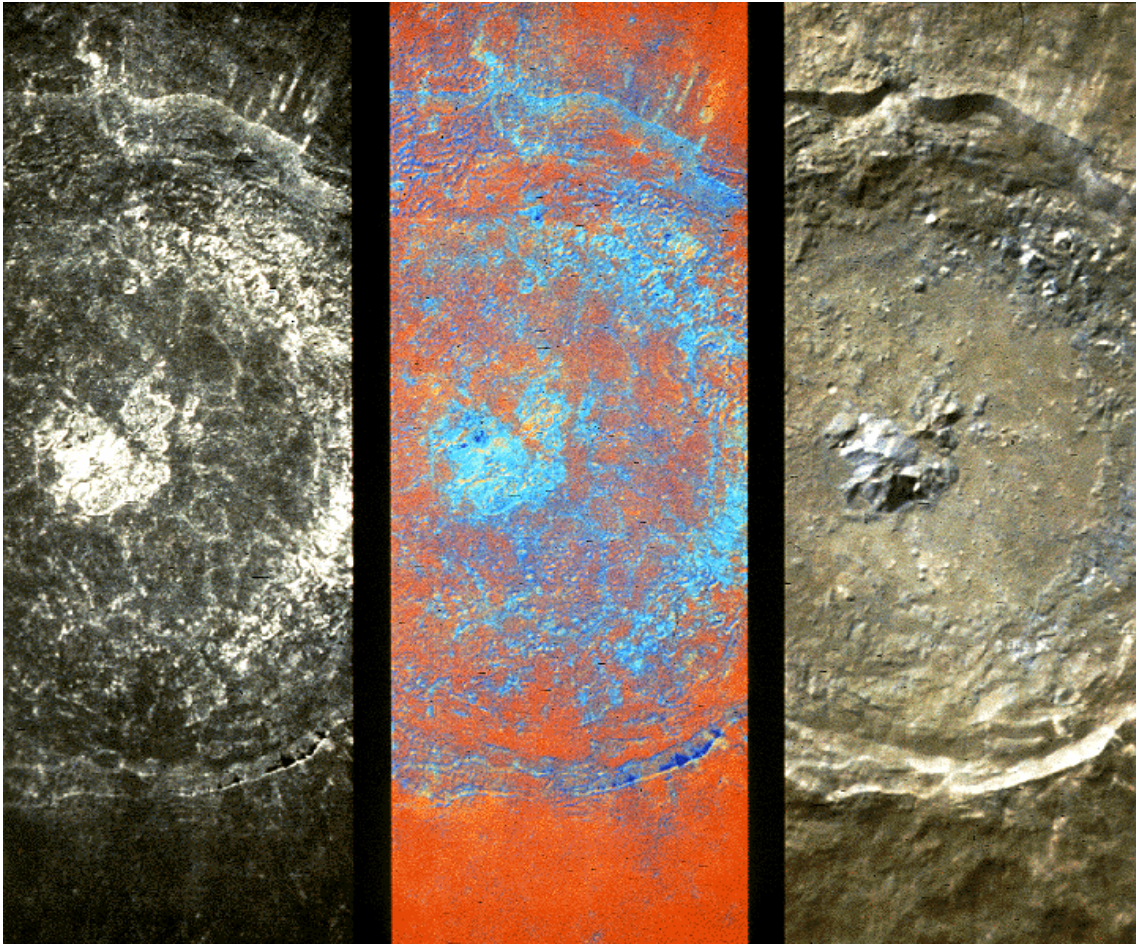


Figure 1-2 Clementine の UV/VIS カメラによるティコ・クレーター中央丘(43S, 11W). 左は 750nm/1000nm の画像. 中央は 750nm/415nm に赤を, 750nm/1000nm に緑を, 415nm/750nm に青を割り当てた画像. 異なるフィルターでの撮像画像の比をとることで, 表層物質の違いを見ることができる. 右は RGB のカラー合成画像. [National Space Science Data Center]

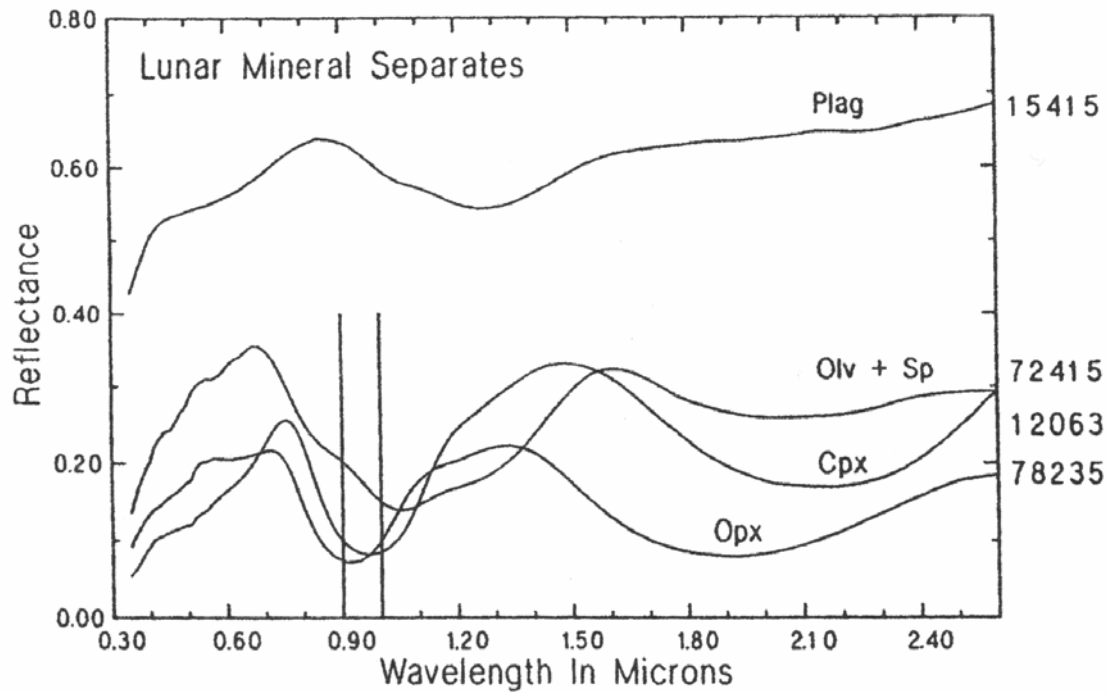
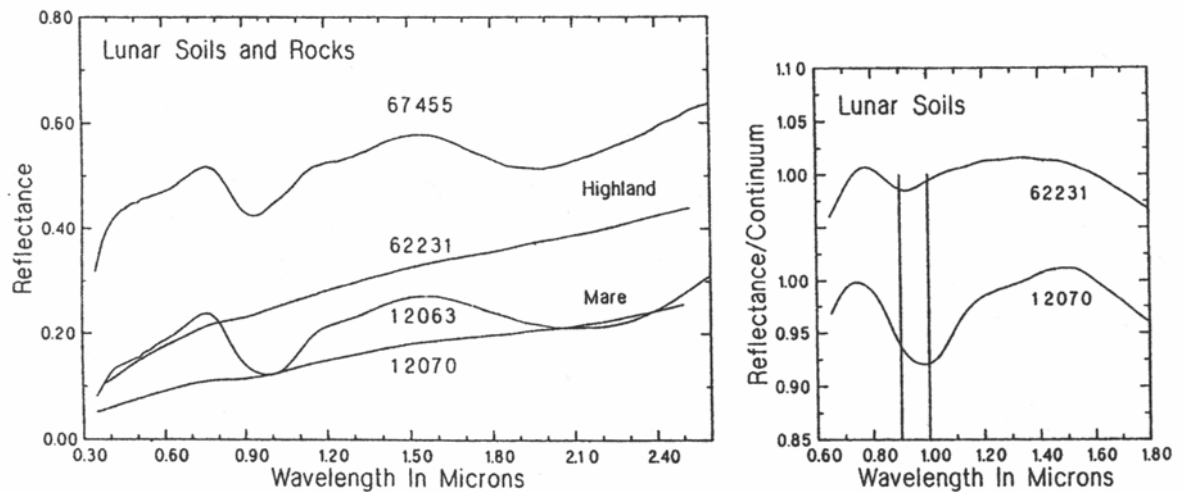
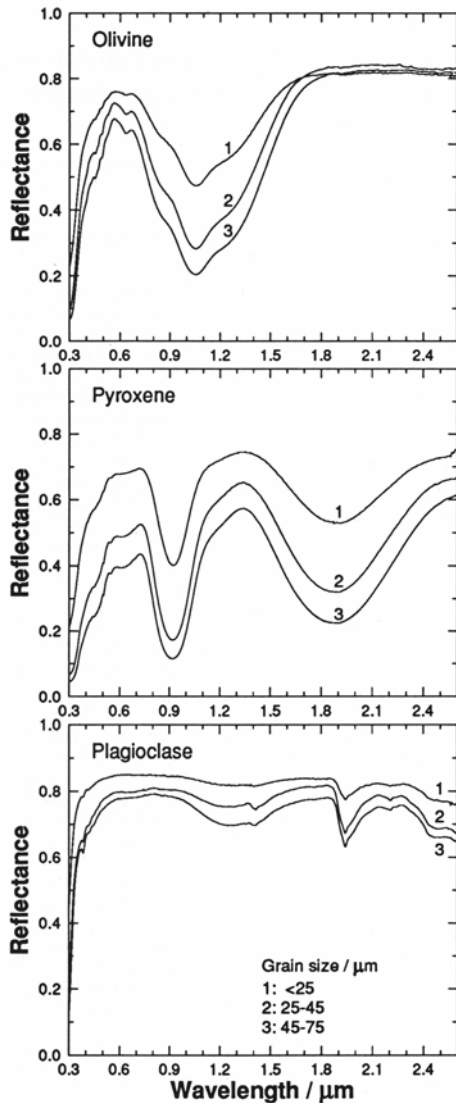


Figure 1-3 月岩石サンプルに含まれる鉱物の反射スペクトル. Plag=plagioclase(斜長石); Olv+Sp=olivine with spinel(スピネルを含むかんらん石); Cpx=clinopyroxene(単斜輝石); Opx=orthopyroxene(斜方輝石). [Pieters et al., 1993]

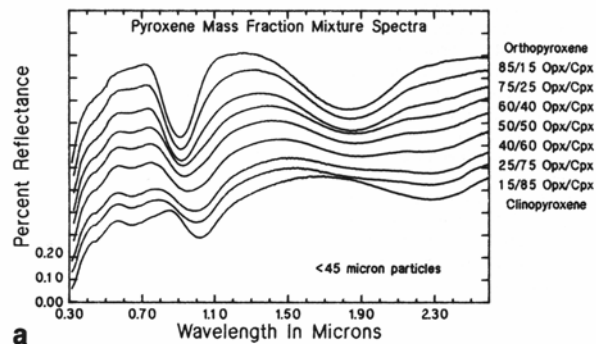


(a)

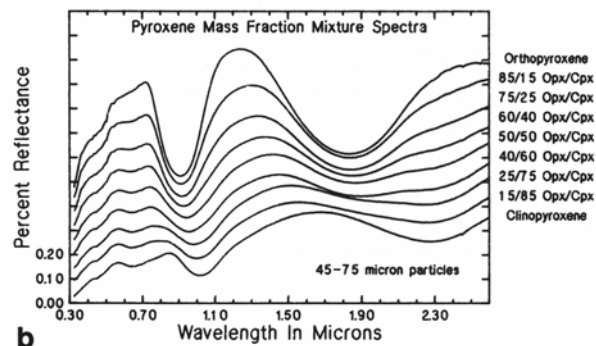
Figure 1-4(a)月の岩石パウダーと土壌の反射スペクトル. 風化された土壌の反射スペクトルは、岩石パウダーのそれよりも反射率が低く、吸収帯が不明瞭である(左). 直線からの残差(continuum)をとることで、詳細な反射スペクトルの様子を見ることができる.



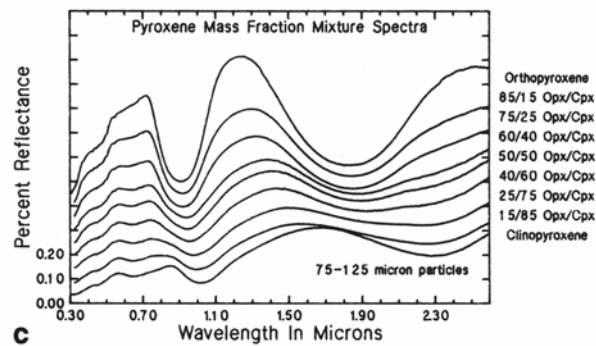
(b)



a



b



c

(c)

Figure 1-4(b)粒径の違いによる反射スペクトルの変化. 上からかんらん石, 輝石, 斜長石で, 粒径は<25 μm (1), 25-45 μm (2), 45-75 μm (3)の3種類. 粒径が小さいほど反射率が高く, 吸収帯は浅くなる. [Hiroi and Pieters, 1994]

(c)粒径と Opx/Cpx の混合比の違いによる反射スペクトルの変化. 上から粒径が<45 μm , 45-75 μm , 75-125 μm . 波長2 μm 付近の吸収帯の中心波長は Opx と Cpx で異なるため同定可能である. 一方, 1 μm 付近の吸収帯は Opx と Cpx の両方に見られるもので, Opx/Cpx の混合比によって中心波長が移動する. [Sunshine and Pieters, 1993]

2. CCD カメラの特性

CCD カメラは、写真フィルム撮影と比較し高感度、高精度、高速ダウンロードと表示、容易な画像合成などの優れた特徴を持つ。また、CCD の特徴として露出が長くなるほど、温度が高くなるほどダークノイズ(暗電流によるノイズ)が発生し、撮像対象がノイズに埋もれてしまうが、CCD を冷却することで暗電流を減少させることができるため、一般的に撮影が困難とされる小さくて暗く淡い天体の撮影に能力を発揮する。CCD の温度を 8-10°C 下げると、暗電流を約半分に抑えることができる。ただし、冷却してもノイズが完全になくなるわけではなく、読み出しノイズと呼ばれる電荷転送中や電荷信号転送中の増幅、電子回路で発生した電氣的ノイズは残ってしまう。

CCD は、画素(ピクセル)と呼ばれる小さな受光面の集合からなり、一列に並べた一次元 CCD と平面に並べた二次元 CCD とがある。一次元 CCD はファックスやイメージスキャナなどに用いられ、二次元 CCD はデジタルカメラやビデオカメラに使用される。

一般的に CCD チップは受光面に入射した光子を電子に変換する。光子が特定の材料に当たると自由電子が放出され、光電子が発生するという物理的な光電効果によるものである。CCD はこのときの変換効率がよく、入射した光子の数に比例する電子を生成することができる。生成された電子は各画素内に蓄積され、規定の信号に従って転送エリアに転送され、先頭から規定の信号により電子を電圧に変換し、内臓のアンプで増幅した後信号を出力する。出力された信号は外部でデジタル変換などいくつかの処理を経て、コンピュータで表示・保存できるように加工される。このように、CCD カメラは、電荷生成・電荷蓄積・電荷転送・電荷検出というプロセスで二次元画像を取得できる。

2-1. Si-CCD カメラ

2-1-1. 可視・近赤外線カメラ ST-7E の仕様

600 nm-1000 nmの可視・近赤外線領域(VIS-NIR)のスペクトル測定、およびイメージングには、Santa Barbara Instrument Group (SBIG)社製のSi-CCDカメラ、ST-7E (VISカメラ)を用いる(Figure 2-1)。その仕様をTable 2-1に示す。ST-7Eに使用されているセンサはKodak社製のKAF-0401Eセンサで、1ピクセルのサイズは $9\ \mu\text{m} \times 9\ \mu\text{m}$ で、 765×510 ピクセル(総画素数約40万画素)の配置となっており、センササイズは $6.885\ \text{mm} \times 4.59\ \text{mm}$ となる。KAF-0401Eセンサは350-1050 nmで感度を持つ。飽和容量が $100,000\ e^-$ に対し暗電流が $1\ e^-/\text{pixel}/\text{sec}$ at $0\ ^\circ\text{C}$ であるため、 $0\ ^\circ\text{C}$ で100,000秒(約28時間)露出を行うと完全な暗黒下でも電子で溢れてしまう。露出時間は回転式シャッターで制御され、0.01 sec 刻みで 0.11-3600 sec までの露出が可能である。センサからの出力はA/Dコンバーターにより16 bit に変換され、PCに表示される。カ

メラとPCはパラレルケーブルで接続されている。センサの温度制御のためにペルチエ冷却素子(Thermo Electric Cooler: TEC)が内蔵され、通常の状態では1段冷却が可能である。また、外部電源を使用することで2段ペルチエ冷却が可能となる。TECは冷却する反作用で熱を発生するため、カメラ背面には放熱ファンが取り付けられており、TECで発生した熱は外部に放出される。さらに水冷ポンプを併用することで、効率的な放熱が可能となる。冷却能力は外気温-45°Cで、0.1°C刻みでの制御が可能である。

2-1-2. Si-CCD エリアセンサ KAF-0401E の量子効率と分光感度

CCD の感度を示すものに量子効率(Quantum Efficiency)がある。量子効率とは、単位時間内に受光部に当たる光子の数(N_p)と、それらの光子によって実際に反応を起こし、輝度情報のひとつとして変換され蓄えられる自由電子の数(N_e) との割合である。例えば、1つの画素において、1秒間に光子が100個入射すると仮定する。これら100個の光子すべてが、光電効果によって100個の電子に変換され蓄積する場合は、量子効率を η として、

$$\begin{aligned}\eta &= N_e / N_p \\ &= 100/100 \\ &= 1.0\end{aligned}\quad (2-1)$$

となる。

また、波長により光子エネルギーの強度が変化するので、量子効率 η は波長の関数である。光子1つのエネルギーを E 、波長を λ [nm]、光速度を $c=3\times 10^8$ [m/s]、 $h=6.6\times 10^{-34}$ [J·s]をプランク定数として、

$$E = hc/\lambda \quad [J] \quad (2-2)$$

となるので、1秒間に N_p 個の光子が入射し、そのエネルギーを W [W(ワット)]とすると、

$$N_p = W/E = W \times (\lambda/hc) \quad [s^{-1}] \quad (2-3)$$

となり、蓄積する電子による光電流を I 、1秒間に流れるキャリア数を N_c とすると、

$$I = eN_c \quad (2-4)$$

の関係から、量子効率は、

$$\eta = N_c / N_p = 1240 \times [I / (W \cdot \lambda)] \quad (2-5)$$

で表すことができる[福島,1996]。

ST-7EのCCDチップである、KAF-0401Eの量子効率をFigure 2-2に示す。全波長中の最大量子効率は600nm付近で、60%を超える。写真フィルムと比較して、感光乳剤の量子効率が1%にも満たないことから[福島,1996]、CCDは効率がよいと考えられる。

また、CCDチップは波長によって感度が異なる。この性質はスペクトル特性あるいは分

光感度(Responsivity)と呼ばれ、これを R とすると、量子効率の式において、ある波長における I を[μA]、 W を[μW]の単位で表し、次のように定義されている。

$$R = I/W = \eta \cdot (\lambda/1240) \quad [\mu\text{A}/\mu\text{W}] \quad (2-6)$$

式 2-6 および量子効率を用いて求めた KAF-0401E の分光感度を Figure 2-3 に示す。最大分光感度は赤色光波長域の 600~650 nm 付近にある。さらに近赤外線領域の 1000 nm を超える波長まで感度をもつ。その反面、短波長側の青色光に対する感度がやや悪い。

2-2. InGaAs-CCD カメラ

2-2-1. 近赤外線カメラ SU320-1.7RT-D の仕様

1000 nm-1600 nm の近赤外線領域(NIR)のスペクトル測定、およびイメージングには、Sensors Unlimited Inc. (SU Inc.)社製の InGaAs-CCD カメラ、SU320-1.7RT-D (NIR カメラ)を使用する(Figure 2-4)。その仕様を Table 2-2 に示す。SU320-1.7RT-D は 900-1700 nm で感度を持つ SU320-1.7T1 センサを内蔵している。1 ピクセルのサイズは $28 \mu\text{m} \times 28 \mu\text{m}$ であるが、隣り合うピクセル間に $12 \mu\text{m}$ の間隔があり、中心距離は $40 \mu\text{m}$ となっている。この隣り合うピクセルの中心距離が pitch である(Figure 2-5)。総画素数は 320×240 ピクセル(76,800 ピクセル)である。このカメラのピクセルクロックは 6.1 MHz で、露出時間を 0.127-16.27 msec までの 8 段階で設定可能である。センサからの出力は A/D コンバーターにより 12 bit に変換される。このデータは、National Instruments (NI)社製の画像入力ボード PCI-1422 を経由し、フレームレート 60 Hz で PC に取り込む。カメラと画像入力ボードは D-Sub37pin のケーブルで接続し、画像入力ボードと PC は、NI 社製の IMAQ SCB-100 Shielded I/O Connector Block and IMAQ D100100 Cable で接続している。PC に取り込んだデータは、NI 社製の計測制御ソフトウェア LabVIEW および IMAQ Vision を用いて作成したプログラム[平尾, 2001]を利用し、データの取得および保存を行う。センサは TEC による 1 段冷却で 291 K (18°C)に一定に自動制御され、外部の冷却装置を必要としないという特徴があるが、冷却できないゆえ暗電流の影響を無視できなくなる。

2-2-2. InGaAs-CCD エリアセンサ SU320-1.7T1 の量子効率と分光感度

SU320-1.7T1 センサの量子効率と分光感度を Figure 2-6 に示す。SU320-1.7T1 の量子効率は、1000-1600 nm の範囲で 70%以上である。この波長範囲はスペクトル測定の対象波長と一致しており、効率がよいといえる。

最大分光感度は 1600 nm 付近にあり、950-1700 nm まで感度を持っていることがわかる。

Table 2-1 Si-CCD カメラ SBIG ST-7E の仕様 [Santa Barbara Instrument Group]

Material	Silica
Pixel Array	765 × 510 pixels 6.885 mm × 4.59 mm
Total Pixels	390,150 pixels
Pixel Size	9 μm × 9 μm
Spectral Response	350 to 1050 nm
Full Well Capacity	100,000 e ⁻
Dark Current	1 e ⁻ /pixel/sec at 0
Shutter	Electromechanical
Exposure	0.11 to 3600 sec, 10 msec resolution
A/D Converter	16 bits
A/D Gain	2.3 e ⁻ /ADU (High Resolution Mode)
Read Noise	15 e ⁻ RMS
Binning Modes	1 × 1, 2 × 2, 3 × 3
Cooling	Single Stage Thermoelectric Double Stage Thermoelectric Active Fan Water Assist Ready
Temperature Regulation	-45 from ambient temperature 0.1
Optical Head	12.5 cm diameter × 7.5 cm deep 0.9 kg
Mounting	T-Thread, 1.25" nosepiece included
Backfocus	2.3 cm

Table 2-2 InGaAs-CCD カメラ SU320-1.7RT-D の仕様 [Sensors Unlimited Inc.]

Material	Indium Gallium Arsenide
Format	320×240 pixels (76,800 pixels)
Pitch	40 μm
Pixel Size	28 μm
Spectral Response	0.9 to 1.7 μm
Quantum Efficiency	> 70 % from 1.0 μm to 1.6 μm
Mean Detectivity, D* ¹⁾	> 10 ¹² cm Hz ^{1/2} /W
Uniformity ²⁾	> 98 %
Full Well Capacity	> 10 million electrons
Digitization	12 bit
Electric Readout Noise	< 2,000 equivalent photoelectrons
Pixel Rate	6.1 MHz
FPA ³⁾ temperature	291 K (18 °C) ⁴⁾
Exposure Times	127 μsec to 16.3 msec in 8 steps
Frame Rate	60 Hz
Temperature:	
Operating	273-313 K (0 °C to -40 °C)
Storage	263-333 K (-10 °C to -60 °C)
L×W×H (cm), Weight (kg)	15.85 × 10.32 × 10.32, 1.1

¹⁾ λ(peak)=1.5 μm, exposure time=16 msec, no lens

²⁾ The percentage of pixels with D*>50% of mean value

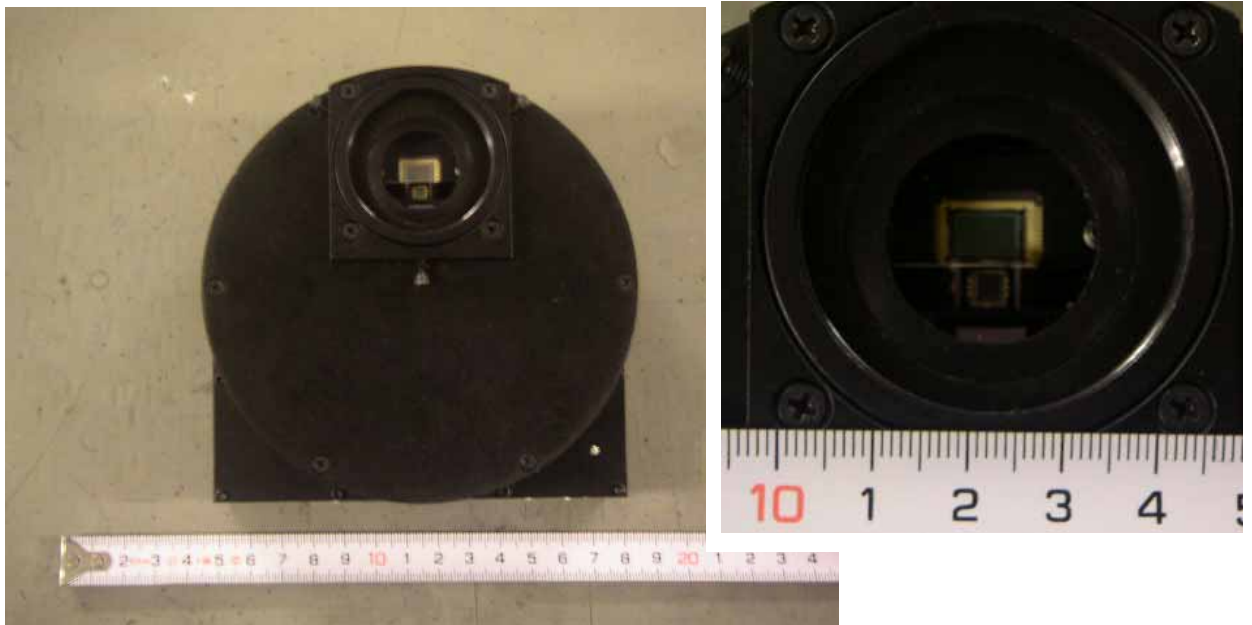
³⁾ FPA: Focal Plane Array

⁴⁾ constant (No external cooling)

* From SENSORS UNLIMITED Inc., SU320-1.7RT InGaAs Area Camera Operation Manual



(a)



(b)

Figure 2-1 (a)可視・近赤外線 Si-CCD カメラ SBIG ST-7E. (b)Si-CCD エリアセンサ. エリアセンサの下側にミラーがあり, ガイド用 CCD が映っている.

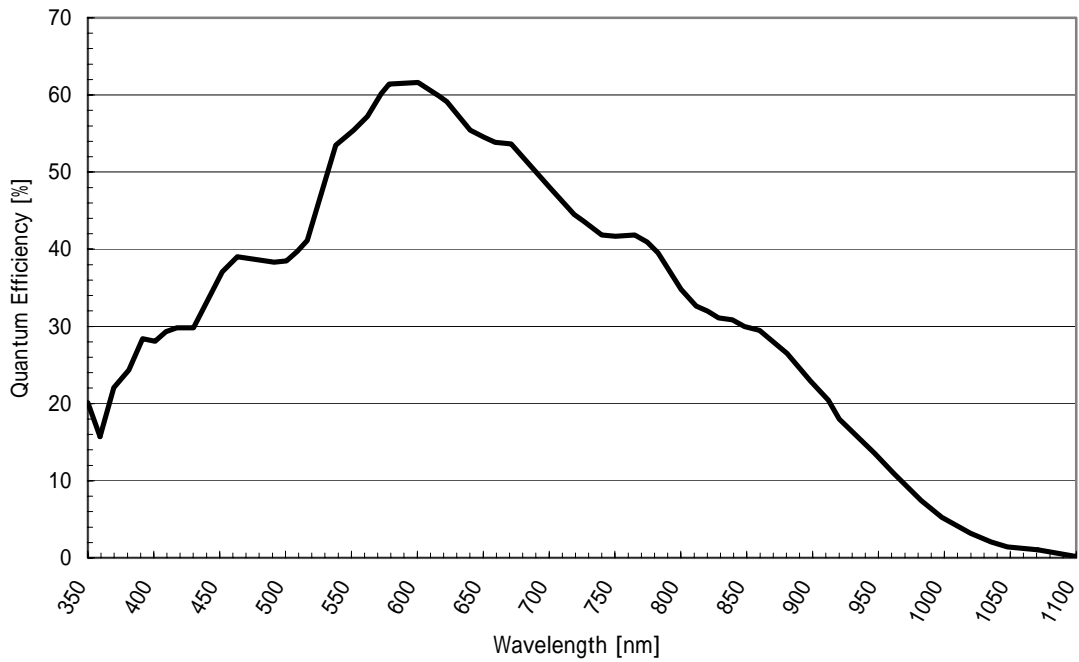


Figure 2-2 KAF-0401E の量子効率. 全波長中の最大量子効率は 600 nm 付近で、60% を超える. [Santa Barbara Instrument Group]

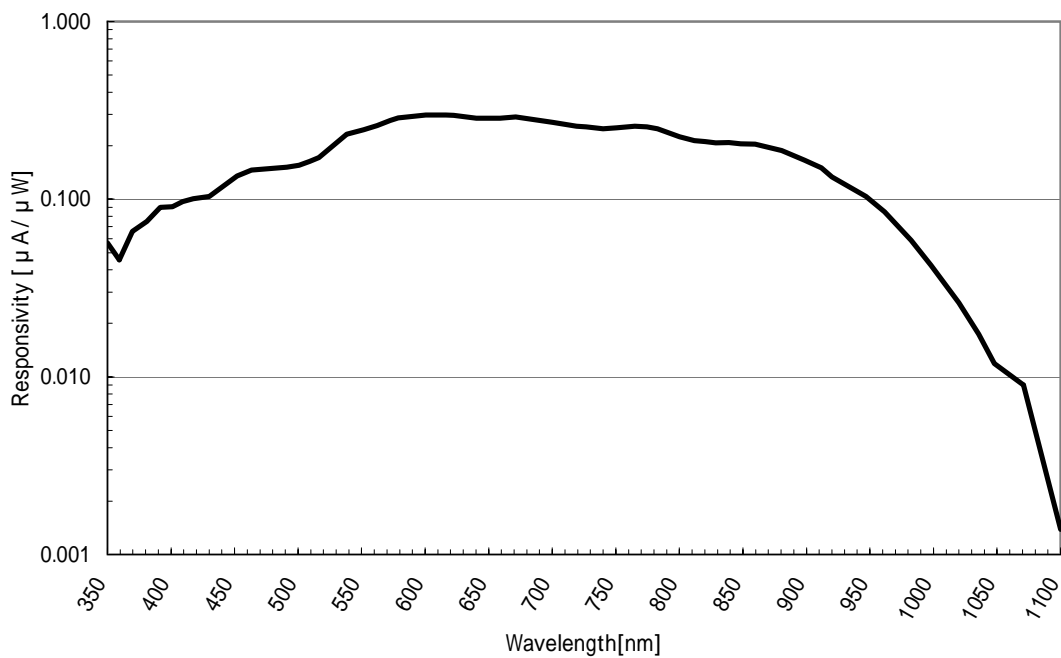
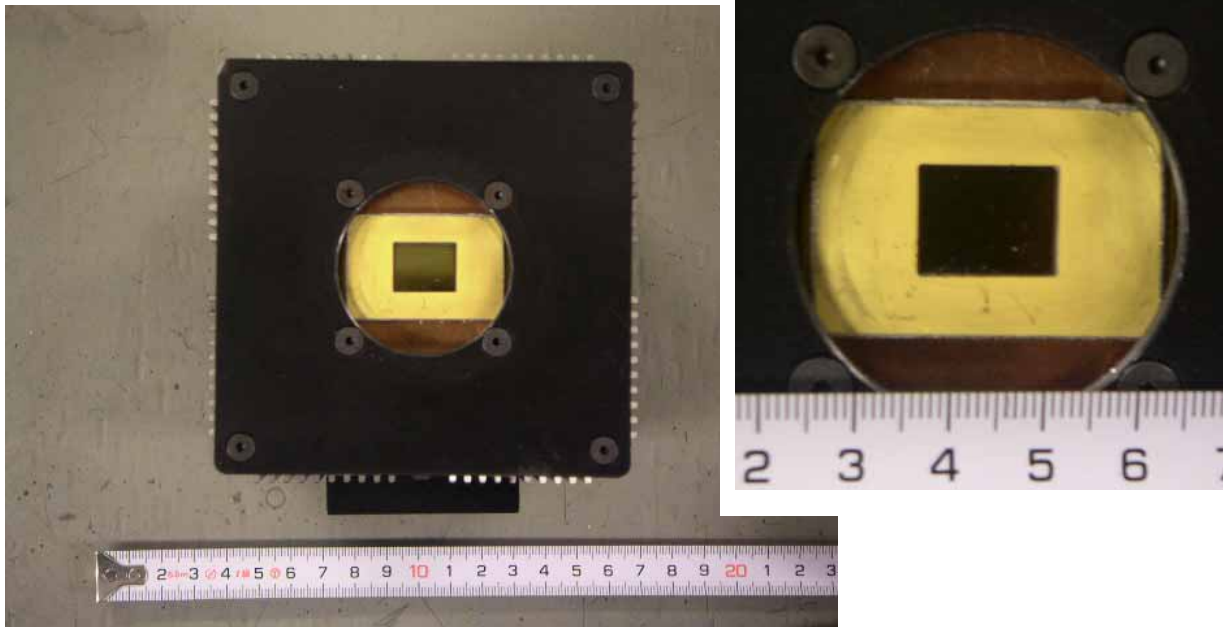


Figure 2-3 KAF-0401E の分光感度. 最大分光感度は赤色光波長域の 600~650 nm 付近にある. さらに近赤外線領域の 1000 nm を超える波長まで感度をもつ. その反面、短波長側の青色光に対する感度がやや悪い. [Santa Barbara Instrument Group]



(a)



(b)

Figure 2-4 近赤外線 InGaAs-CCD カメラ SU320-1.7RT-D. (b)InGaAs-CCD エリアセンサ.
(c)SU320-1.7RT-D の概要図. [Sensors Unlimited Inc.]

SU320-1.7RT
Indium Gallium Arsenide Area Cameras

Appendix B: Mechanical Drawings

(all dimensions in inches)

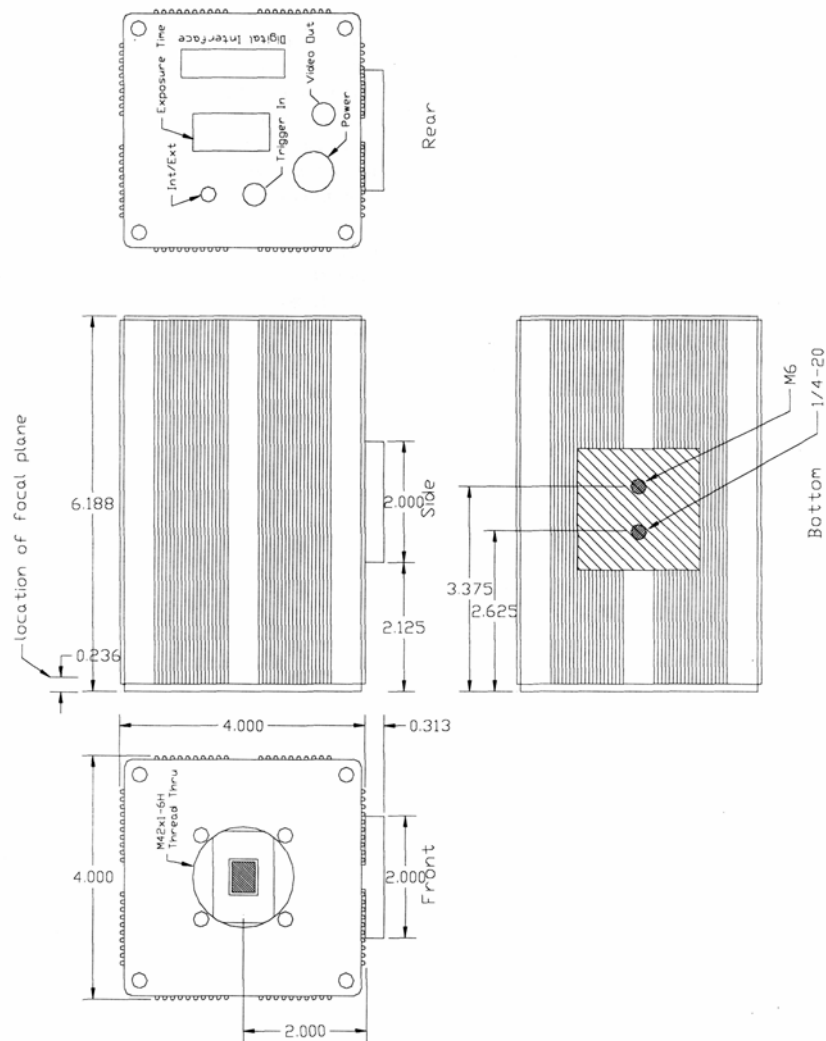


Figure 2-4 (c)

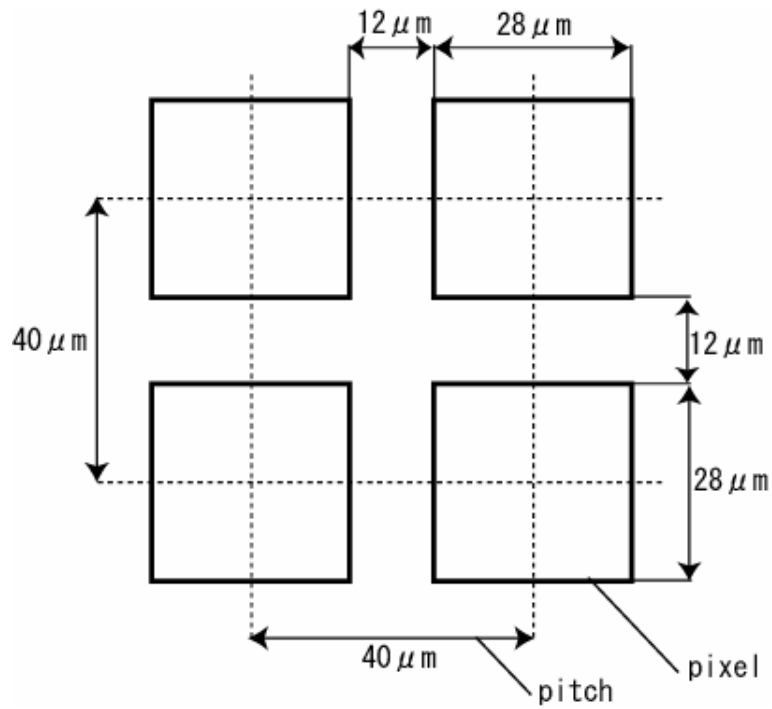


Figure 2-5 ピクセルと pitch の関係.

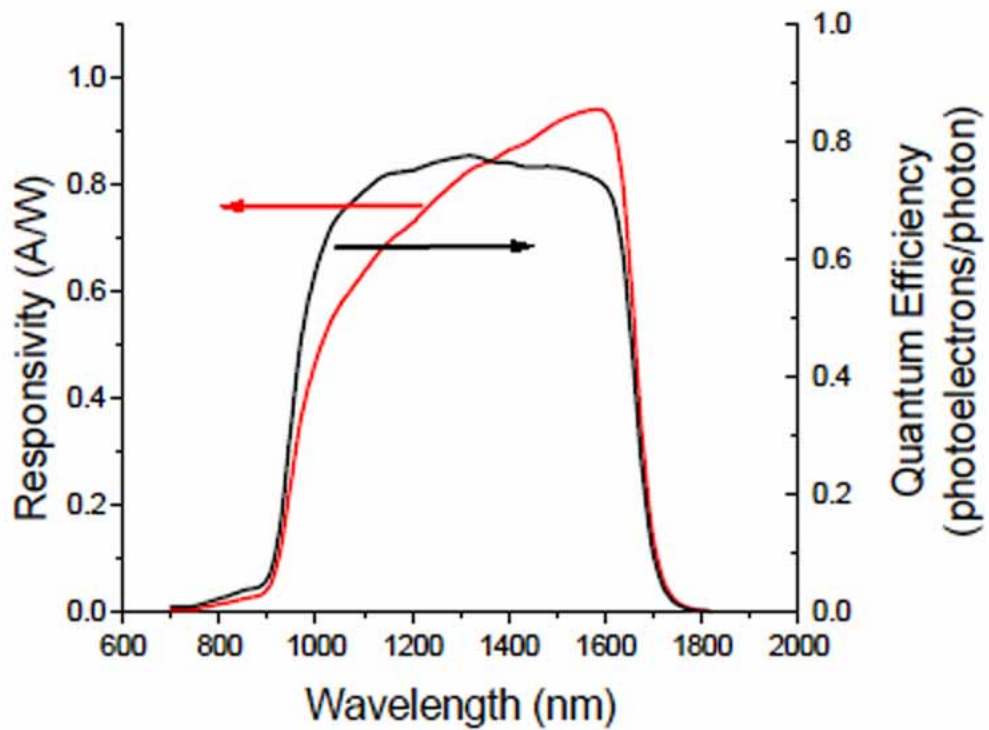


Figure 2-6 SU320-1.7T1 の量子効率と分光感度 [Sensors Unlimited Inc.]

3. 連続分光撮像システムの構築

3-1. 望遠鏡の選択

望遠鏡を選択する際に考慮しなければならないのは、口径と口径比(F 値：焦点距離を口径で割ったもの)である。分光器を使用して連続スペクトル取得とイメージングを行うとき、最終的な S/N 比を向上させることでノイズの影響を無視できるようなデータを得ることが望ましい。このとき、望遠鏡の口径が大きいほど、また F 値が小さいほど入射光量が多くなる。もう一つ、重要なことは望遠鏡を載せる架台の耐荷重である。望遠鏡および分光器、CCD カメラの総重量が架台の耐荷重を超えた場合、架台の導入精度・追尾精度の低下やギアの磨耗・欠損を招いてしまう。

これらを考慮し、連続分光撮像システムの望遠鏡として、Takahashi MT-300V ニュートン反射望遠鏡を選択し、架台として同じく Takahashi EM-500 赤道儀を使用する(Figure 3-1)。望遠鏡と赤道儀の使用を Table 3-1 に示す。MT-300V は主鏡に放物面鏡を使用したニュートン反射望遠鏡で、有効径は 300 mm、焦点距離は 1500 mm の F5.0 の光学系である。鏡筒の全長が 1445 mm で、重量が 27 kg を超えるため、架台の耐荷重もこれ以上のものが必要となる。EM-500 は 2 軸モーター内蔵のドイツ式赤道儀で、耐荷重(同架重量)は 40 kg となっている。

3-2. 分光器の設計

分光器の設計を行うにあたり、まず、分光器スリットの幅と波長分解能を決定しなければならない。

スリットは対象天体の周辺の光を遮断することにより、検出器上でスペクトルに重なり得る周辺光のスペクトルを除くことができ、その結果、S/N の向上につながる。望遠鏡の焦点面、あるいはそれに準ずる場所に置かれる。スリット幅は波長分解能を決める役割も果たす。一般に、検出器上でのスリット像が 2-3 ピクセルに対応するようにスリット幅を決定する。本研究では、スリット幅と検出器上でのスリット像が 1:1 となるように設計するため、ピクセルサイズの大きい NIR カメラの 2 ピクセルに対応するようにスリット幅を決定する。NIR カメラのピクセルサイズは 28 μm であるが、検出器上でのサイズを考慮するため pitch サイズの 40 μm を 1 ピクセルとし、スリット幅を 80 μm と決定した。

波長分解能は、どれだけ細かい波長範囲を識別できるかを示すものである。分光された特定波長の像は拡がりを持つため、波長の違いが小さいと隣り合う波長の像が重なり合い識別が不可能となる。本研究では、中心波長 1000 nm で 10 nm/pix の分解能を目標とする。

3-2-1. 補正系 F 値の決定

望遠鏡の F 値は既に固定されているが、補正レンズを装着することで F 値を変換することができる。F 値を変換することで、検出器上での空間分解能が変化し、また S/N も変化するため、最適な F 値を決定しなければならない。本研究で目標とする波長分解能、空間分解能、S/N を Table 3-2 に示す。600-1600 nm の可視-近赤外領域を対象とし、波長分解能は NIR で 10 nm/pix、空間分解能は NIR で 10 km/pix、SN が 100 以上を目標とする。波長分解能は 1000 nm 付近における Fe^{2+} の吸収帯の様子を見るために必要な分解能である。また、空間分解能は月の海の溶岩流層の平均組成を調査できる分解能である。

Table 3-3 に NIR での空間解像度を変化させた場合の F 値と、NIR/VIS での S/N の変化を示す。空間解像度はスリット幅を基準として、2 ピクセルの場合を考えている。そのため、NIR の空間解像度で 20 km/2 pix が目標となる。このときの F 値は F5.1 であり、S/N はビニングすることで 100 以上を達成可能である。この結果から、F5.0 で光量を確保する、あるいは F6.0 で空間解像度を上げるという選択肢が出てくるが、F5.0 の場合は、結像性能に影響が出てしまう。また、F6.0 にしたとしても空間解像度の向上は望めないため、補正系の F 値を F5.5 と決定した。

3-2-2. ダイクロイックミラーの仕様

ダイクロイックミラーは多層膜干渉フィルターの一種で、入射してきた光をある特定の波長で反射する成分と透過する成分に分けることができる反射鏡である。本研究では、可視光を反射させ VIS カメラで検出、赤外光を透過させ NIR カメラで検出することとする。ここではダイクロイックミラーの切り換え波長幅(Transition Zone)と切り換え中心波長について考察する。

Figure 3-2 に Transition Zone が 100nm (切り換え波長: 900-1000 nm) のとき(a)と 50 nm (同: 950-1000 nm) のとき(b)の 1 ピクセルあたりの S/N 変化を示す。どちらも、1000nm 付近での S/N に変化は見られないが、800 nm 以下での S/N に大きな違いが現れている。(b)の Transition Zone が 50 nm の場合に、800nm 以下での S/N の変化が大きくなっている。そのため、ダイクロイックミラーは Transition Zone が 100 nm のものを用いることとする。Transition Zone が 100 nm (切り換え波長: 900-1000 nm) のときのダイクロイックミラーの透過率を Figure 3-3 に示す。

次に、Transition Zone が 100 nm のとき、切り換え波長を変化させた場合に S/N がどのように変化するかをシミュレートした(Figure 3-4)。切り換え波長は、(a)は 900-1000 nm、(b)は 950-1050 nm、(c)は 980-1080 nm、そして(d)が 1000-1100 nm の場合である。その結果、(a)または(b)のときに VIS/NIR での切り換えが効率的に行われることがわかる。また、VIS の

みで解析を行う場合を考えると、1020 nm まで S/N を確保できる(b)の Transition Zone 950-1050 nm が最適である。以上のことから、ダイクロイックミラーの仕様を決定した(Table 3-4)。

3-2-3. スリットビューアの選択

分光器スリットのスリットビューアとして、Web カメラを使用する。Web カメラを使用する利点として、CCD 素子を使った高感度のカメラが安価に入手できることと、望遠鏡架台の耐荷重を考慮しなくてよいほど軽量であることがあげられる。

ビューア用カメラとして、Philips 社の ToUCam Pro (Figure 3-5)を用いて光量調査を行った。ToUCam Pro の CCD チップは SONY の ICX098BQ で、有効画素数が 659×494 ピクセル、 $5.6 \times 5.6 \mu\text{m}$ のピクセルサイズである。ただし、ToUCam Pro の仕様としての有効画素数は 640×480 ピクセルである。

ToUCam Pro+MT-300(補正レンズあり $f=1650$, F5.5)の画角は $7'28'' \times 5'36''(0.7''/\text{pixel})$ 、月面分解能としては $865 \times 649 \text{ km}(1.35 \text{ km}/\text{pixel})$ となる。VIS カメラの分解能は $4.5 \text{ km}/2 \text{ pixels}$ なので、ToUCam Pro は VIS の 1.66...倍の分解能となる。よって、ToUCam Pro の焦点距離を $1/1.66...$ 倍すれば VIS の分解能と同等にすることができる。したがって、ToUCam Pro のレンズ設計として $f=990\text{mm}$, F3.3 が適当である。このとき、ToUCam Pro の画面上でのスリット長は、CCD 長辺方向の $2/3$ 程度であり、位置確認は可能である。

さらに、2003 年 11 月 13 日(月齢 18.7)に R バンドフィルター($612 \sim 670\text{nm}$, $\Delta\lambda=58\text{nm}$ (Figure 3-6))を装着した ToUCam Pro+MT-300(補正レンズなし $f=1500$, F5.0)で撮像テストを実施した。このときのティコ、コペルニクス、雨の海の画像を Figure 3-7 に示す。また、撮像画像 ($1/100\text{sec}$ 露出)から読み取ったティコ、コペルニクス、雨の海の 3 地点の DN 値を示す(Table 3-5)。補正レンズ、ビューア用レンズ、ともに無しの状態での DN 値なので、これを補正レンズ、ビューア用レンズを取り付けた場合の DN 値に変換する。DN 値は、①補正レンズ透過率を 9 割、②F5.0→F3.3 に光量変換、③ビューアミラー反射率を 7 割、④ビューア用レンズ(4 枚)透過率を 7 割、としたときの DN 値である(Table 3-6)。その結果、光量補正後の DN 値は、8bit 階調の半分以下なので、フィルターの半値幅を拓げることで光量を確保できる。その際、CCD の分光感度特性(Figure 3-8)も考慮に入れると、フィルターの波長は $600 \sim 750\text{nm}$ 程度、透過率が 8 割以上あればよい。そこで、この条件にみあうフィルターを探したところ、朝日分光株式会社の PB0680-140 フィルター(Figure 3-9)が最も近いので、このフィルター特性を仕様として決定。

Table 3-1 (a)Takahashi MT-300V ニュートン反射望遠鏡の仕様 [高橋製作所]

形式	システムパラボラ光学系
主鏡	放物面鏡
有効径	300mm
焦点距離	1500mm
口径比	1:5.0
分解能	0.38 秒
集光力	1837 倍
極限等級	14.2 等
斜鏡短径	95mm
鏡筒径	324mm
全長	1445mm
重量	約 27kg

Table 3-1 (b)EM-500 赤道儀仕様 [高橋製作所]

形式	2 軸モーター内蔵ドイツ式赤道儀
赤経微動	ウォームホイール全周微動(減速比 144:1) ステッピングモーターによる電動駆動(手動不可) ハイスピード・ノーマル駆動切り換え可能
赤緯微動	ウォームホイール全周微動(減速比 144:2) ステッピングモーターによる電動駆動(手動不可) ハイスピード・ノーマル駆動切り換え可能
方位微動	ダブルスクリュウ方式 可動範囲 $\pm 7^\circ$
傾斜角微動	スクリュウ方式 可動範囲 高度 $5^\circ \sim 45^\circ$
目盛環	赤経:最小目盛 10 分 赤緯:最小目盛 2 度
追尾精度	$\pm 3.5''$
同架重量	約 40 kg
本体重量	約 40kg (バランスウェイト, 鏡筒バンド別)
極軸望遠鏡	固定内蔵式 据付精度 約 2'
	スケールパターン(暗視野照明付), リングレベル付 *北極星用歳差補正目盛(2015 年まで対応) *南極星八分儀座 σ 星用歳差補正目盛(2015 年まで対応)
付属品	バランスウェイト(10 kg)2 個 コントロールボックス

Table 3-1(c)EM-500 モータードライブ仕様 [高橋製作所]

駆動方式	水晶発振制御 回転誤差 0.05 % (対恒星時) 駆動周波数 60 PPS 南半球用逆転スイッチ付 オートガイダ-接続端子付 太陽時/恒星時切換スイッチ付
高速駆動	赤経方向: 300 倍速 (対恒星時) 赤緯方向: ± 4500 秒角/sec
補正駆動	赤経増速方向: 100 % ~ 190 % (対恒星時, 9 段階設定) 赤経減速方向: 100 % ~ 10 % (対恒星時, 9 段階設定) 赤緯方向: $\pm 0 \sim 13.5$ 秒角/sec (9 段階設定)
電源電圧	定格 DC24 V
消費電流	恒星時駆動のみ: 600 mA (at 24 V) 両軸高速駆動時: 900 mA (at 24 V)
動作温度	-5 ~ +30

Table 3-2 波長分解能, 空間分解能, S/N 目標値

Wavelength [nm]	Spectral Resolution (NIR) [nm/pix]	Spatial Resolution (NIR) [km/pix]	S/N
600-1600	10	10	100 ~ 200

Table 3-3 空間解像度と F 値および S/N の変化

NIR 空間解像度		f [mm]	F 値	NIR S/N at 950 nm	VIS S/N at 950 nm
km/2 pix	arcsec/2 pix				
2	1.1	15238	50.8	0	4
3	1.6	10159	33.9	0	8
4	2.2	7619	25.4	1	13
6	3.2	5079	16.9	2	22
8	4.3	3810	12.7	3	32
10	5.4	3048	10.2	5	41
15	8.1	2032	6.8	11	65
20	10.8	1524	5.1	20	88
30	16.2	1016	3.4	45	133
40	21.6	762	2.5	77	178
50	27.0	610	2.0	118	223
60	32.4	508	1.7	164	268

Table 3-4 ダイクロイックミラーの仕様

分離波長(T=50%)	1000nm ± 10nm
透過率	> 90 % @1050nm - 1600nm < 5 % @750nm - 950nm (反射率 > 95%) < 80 % @600-750nm
サイズ	20mm × 20mm
厚さ	1mm
面粗度	< /10 以下

Table 3-5 撮像画像から読み取ったティコ，コペルニクス，雨の海の3地点のDN値.

1/100sec	Min	Max	Mean
ティコ	53	114	96
コペルニクス	56	112	84
雨の海	35	82	53

Table 3-6 補正後のティコ，コペルニクス，雨の海の3地点のDN値.

1/100sec	Min	Max	Mean
ティコ	54	115	97
コペルニクス	57	113	85
雨の海	35	83	53



Figure 3-1 Takahashi MT-300V ニュートン反射望遠鏡と Takahashi EM-500 赤道儀.

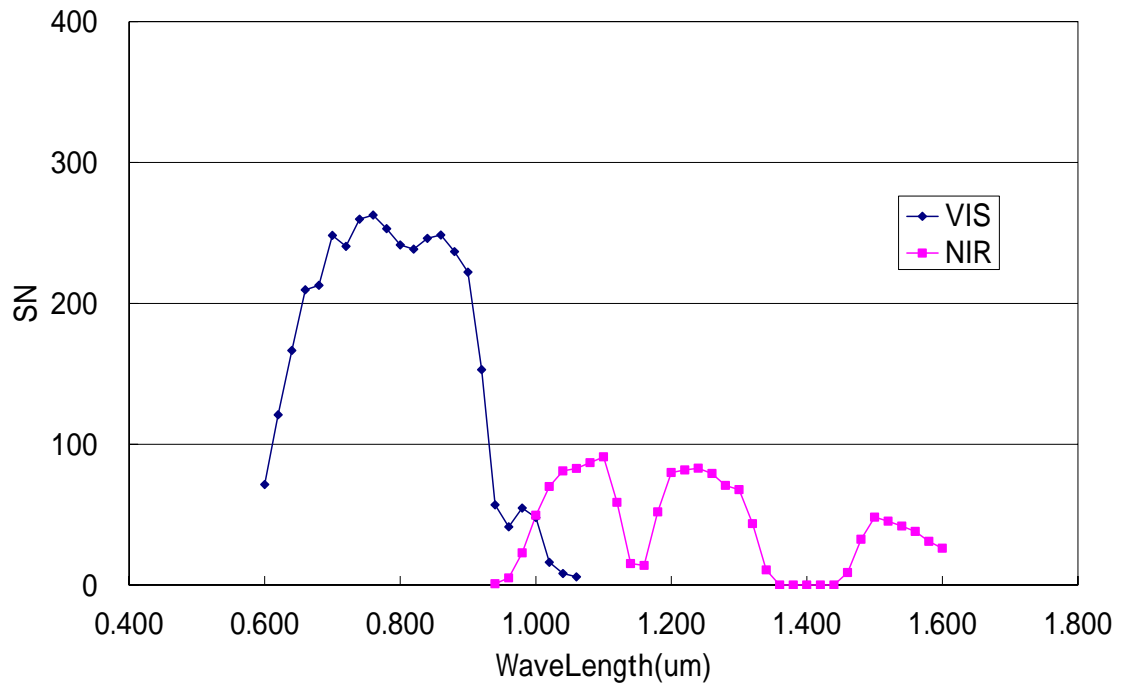


Figure 3-2 (a) Transition Zone 100 nm (切り換え波長：900-1000 nm)の場合の S/N

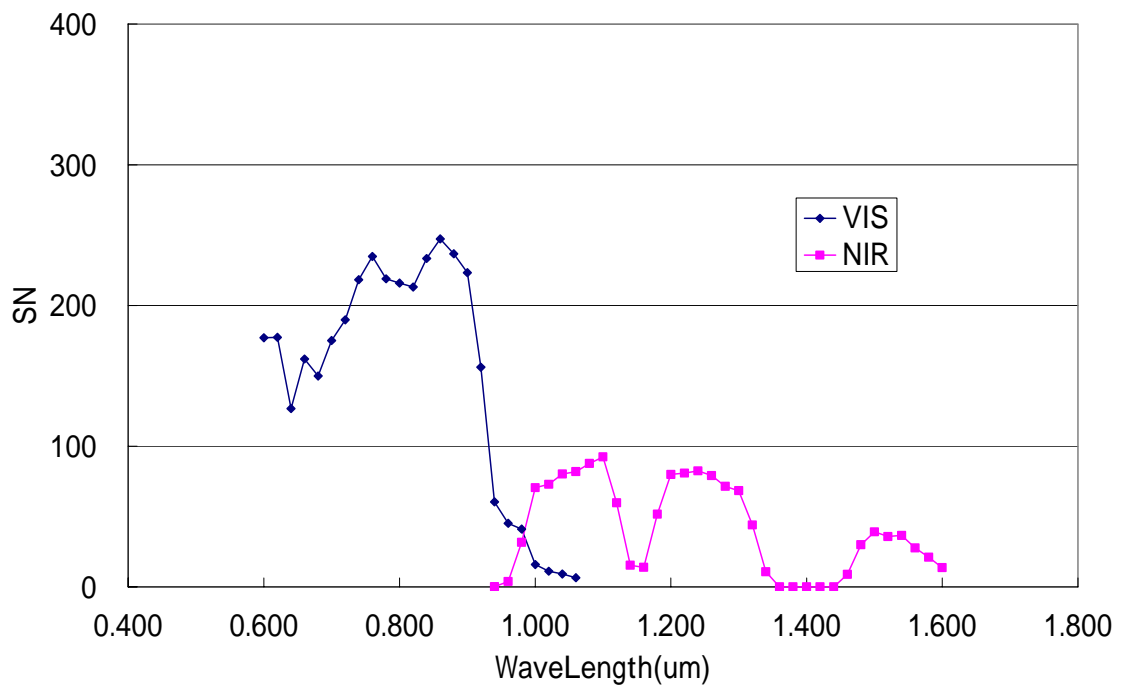


Figure 3-2 (b) Transition Zone 50 nm (切り換え波長：950-1000 nm)の場合の S/N

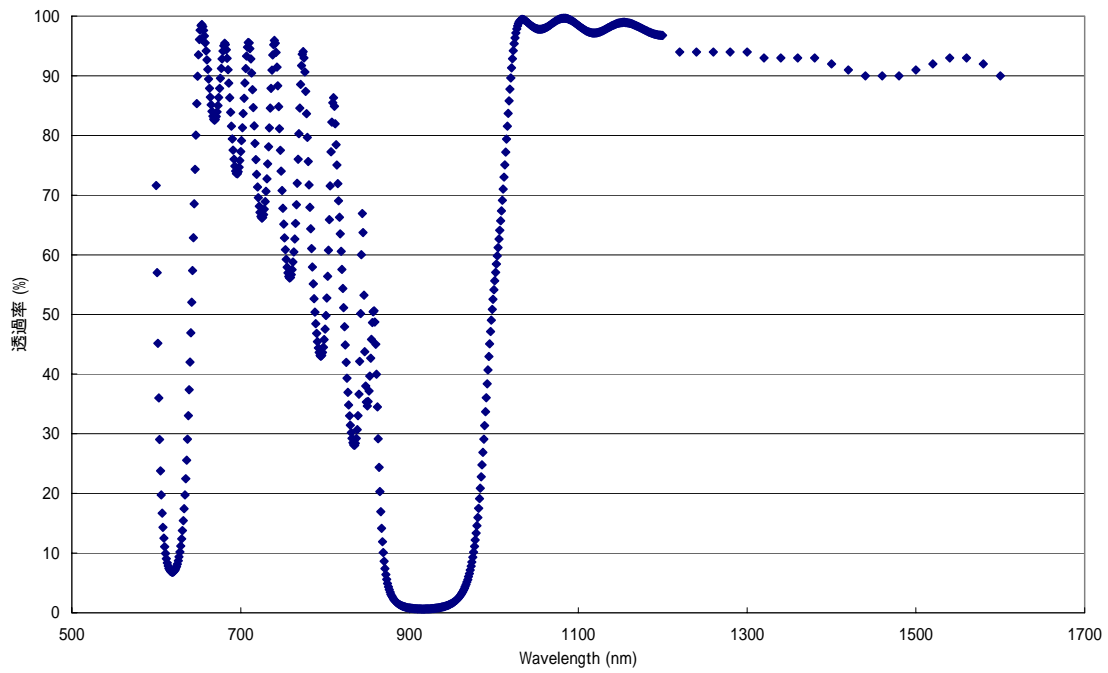


Figure 3-3 Transition Zone が 100 nm (切り換え波長: 900-1000 nm)のときのダイクロイックミラーの透過率

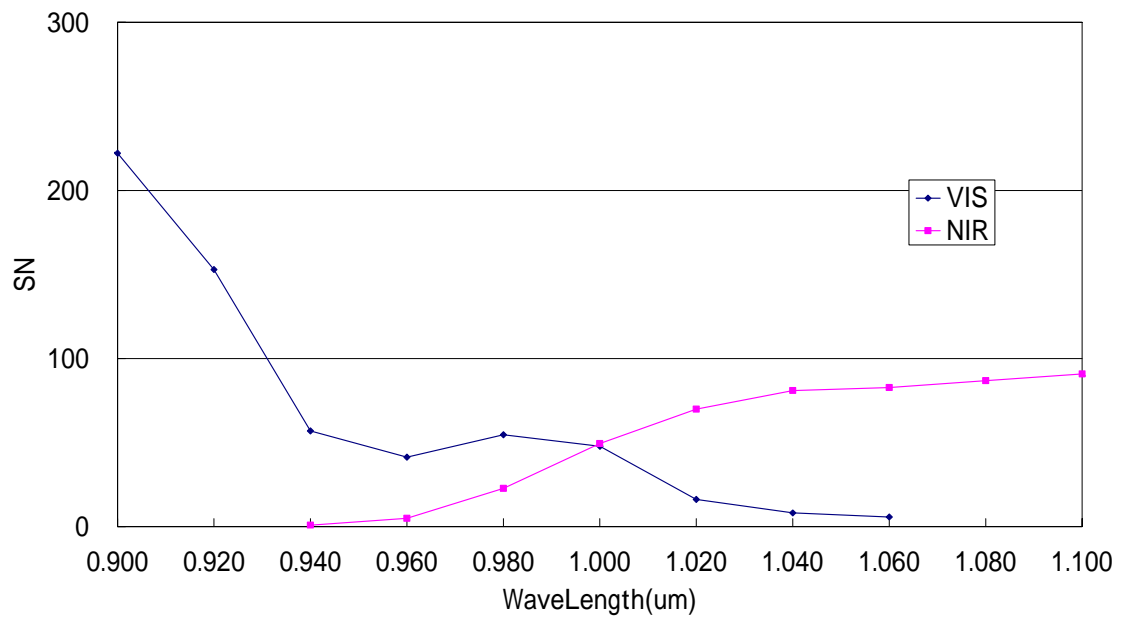


Figure 3-4 (a) Transition Zone が 900-1000 nm の場合の S/N 変化

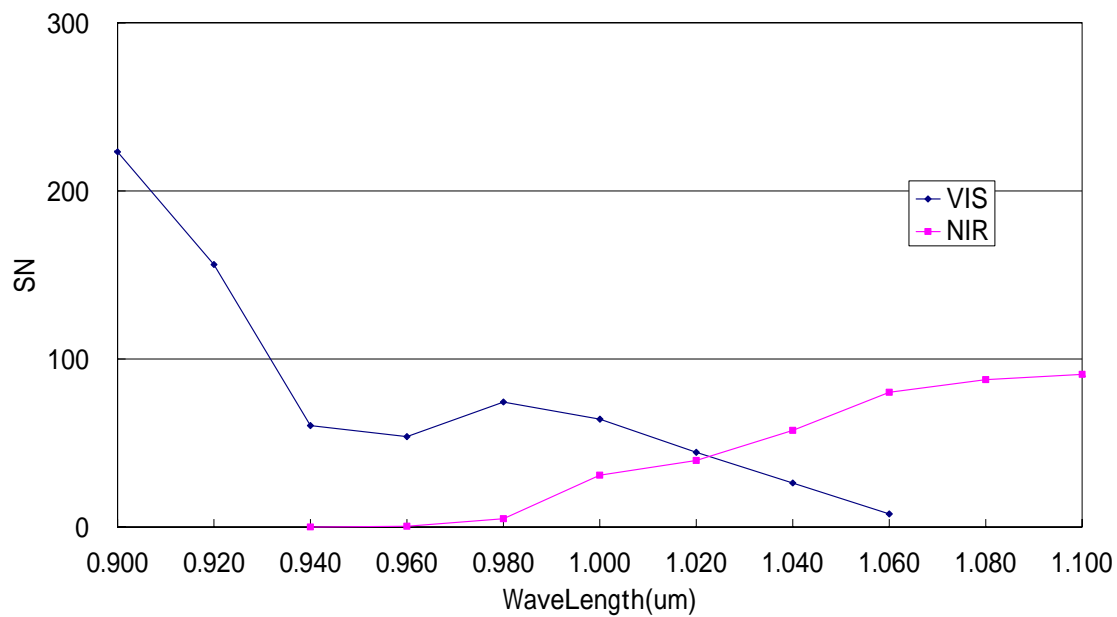


Figure 3-4 (b) Transition Zone が 950-1050 nm の場合の S/N 変化

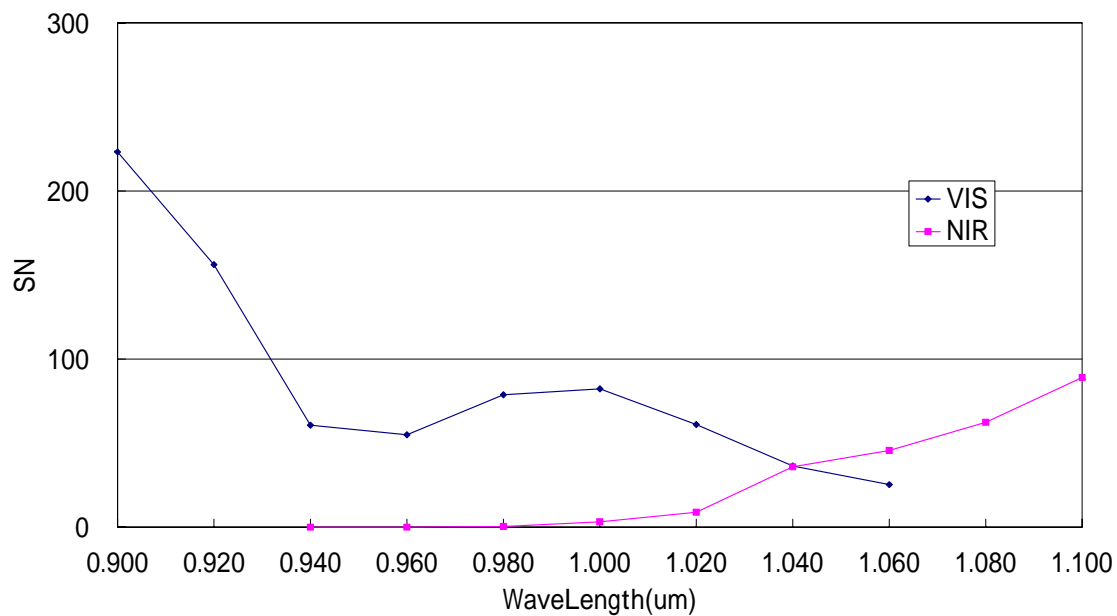


Figure 3-4 (c) Transition Zone が 980-1080 nm の場合の S/N 変化

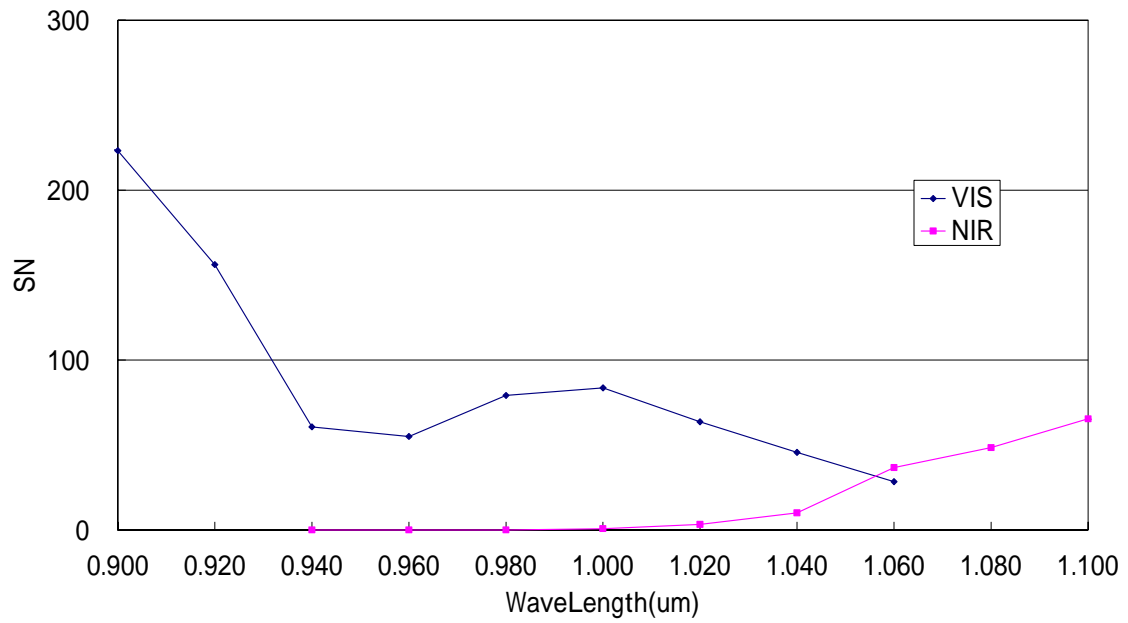


Figure 3-4 (d)Transition Zone が 1000-1100 nm の場合の S/N 変化



(a)

Figure 3-5 (a)ToUCam Pro の概観. (b)ToUCam Pro の CCD センサ. レンズをはずしたところから CCD センサが見える. (c) ToUCam Pro の基盤.



Figure 3-5 (b)

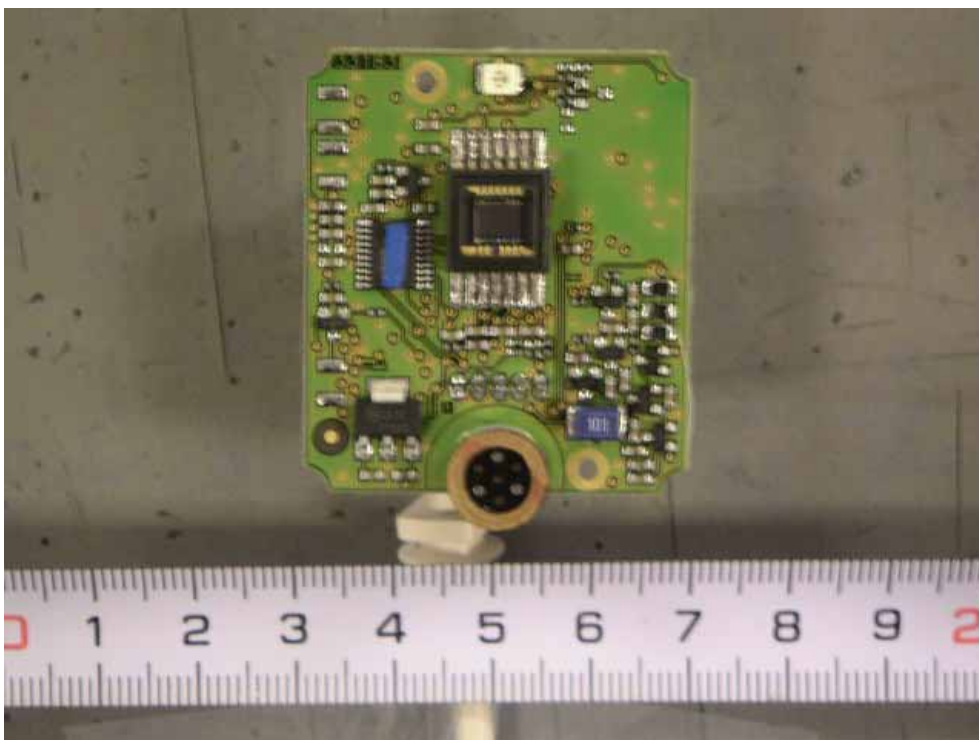


Figure 3-5 (c)

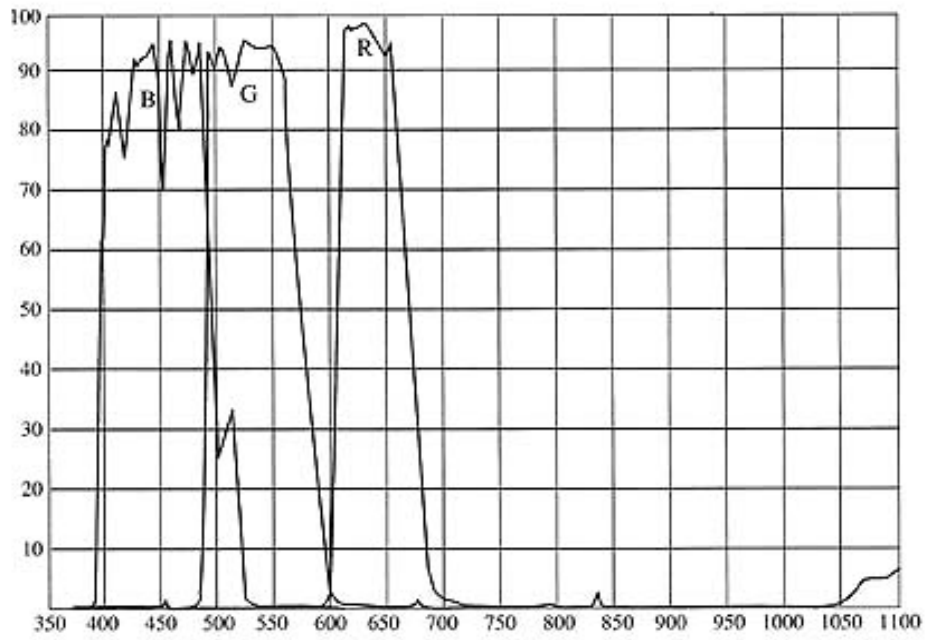


Figure 3-6 SBIG 社製 RGB フィルターの透過率



(a)

Figure 3-7 (a)ティコクレーター. (b)コペルニクスクレーター. (c)雨の海. いずれも 1/100 sec 露出で撮像.

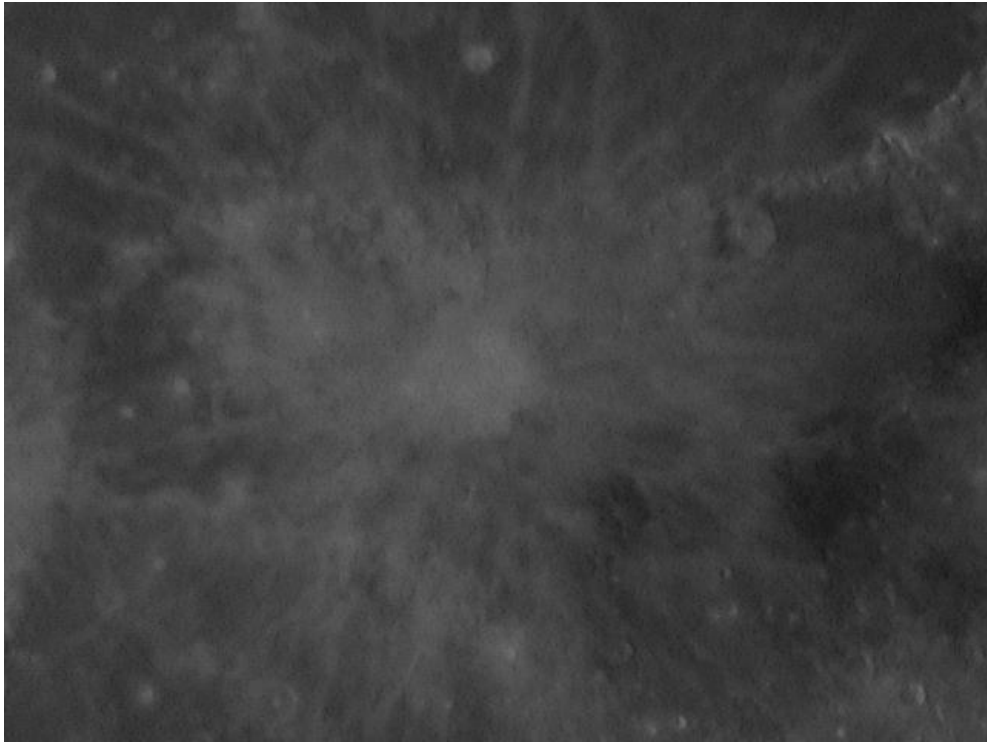


Figure 3-7 (b)

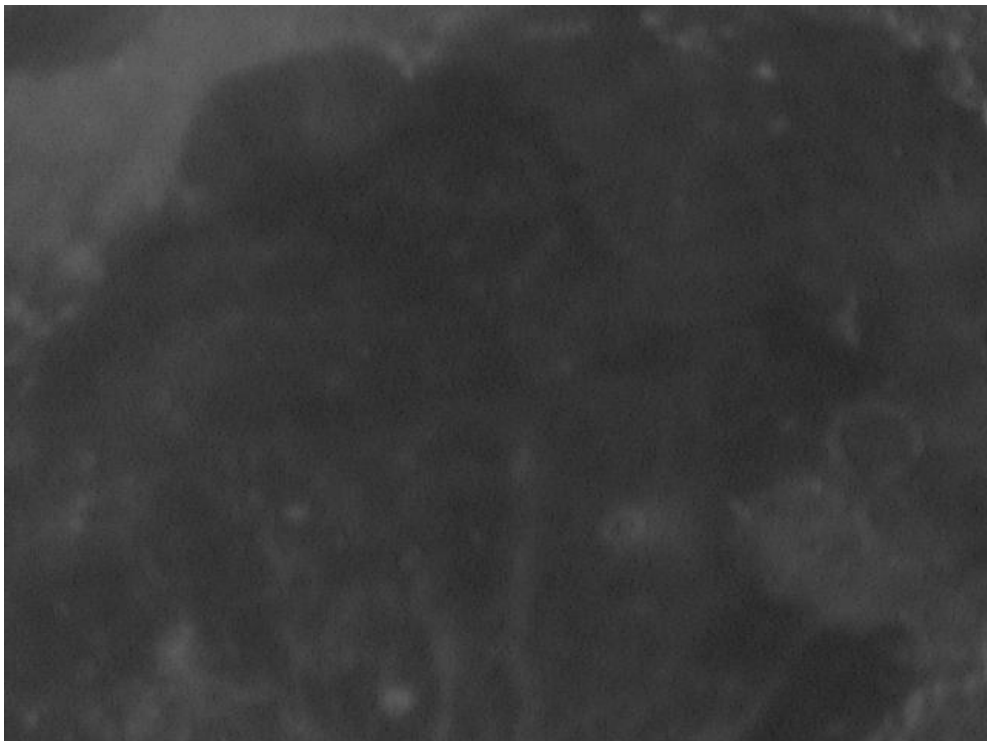


Figure 3-7 (c)

分光感度特性例（ただし、レンズ特性 および光源特性を除く）

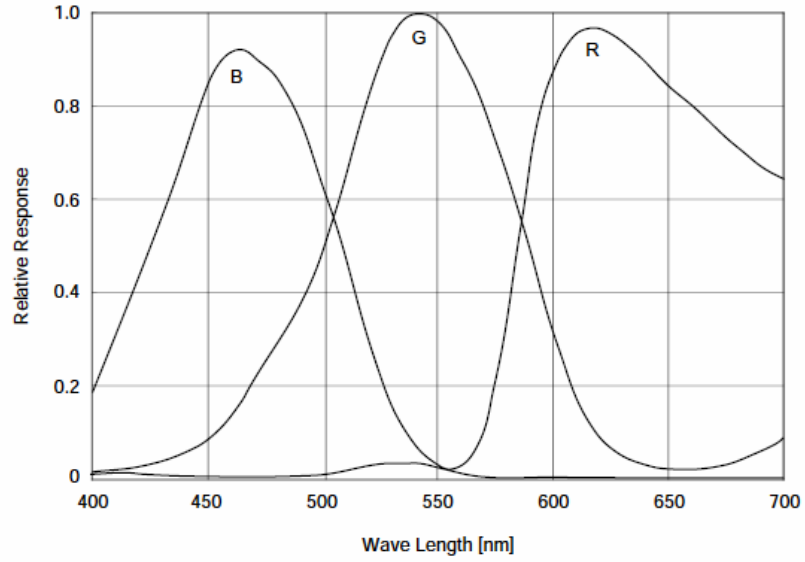


Figure 3-8 ICX098BQ の分光感度

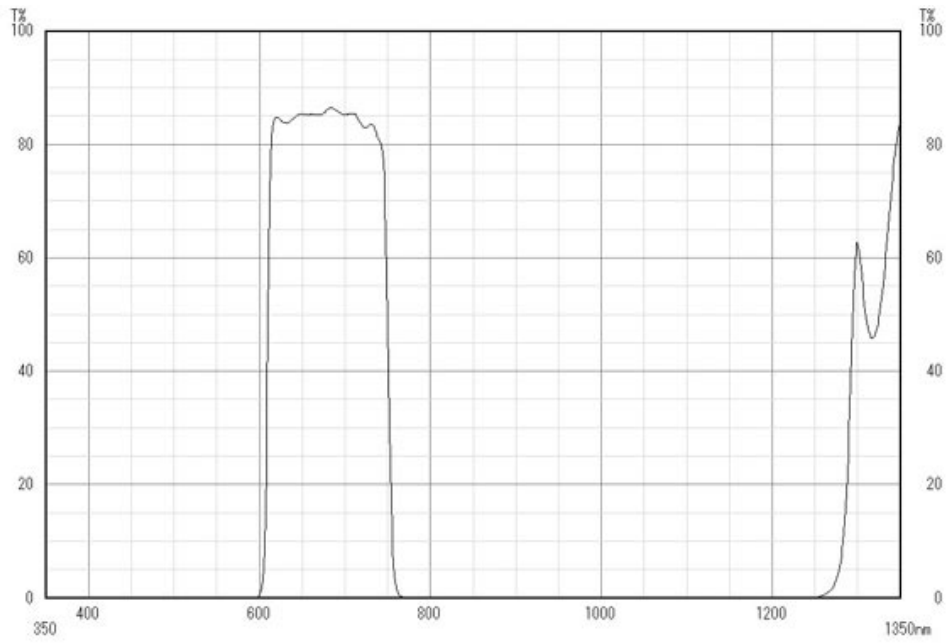
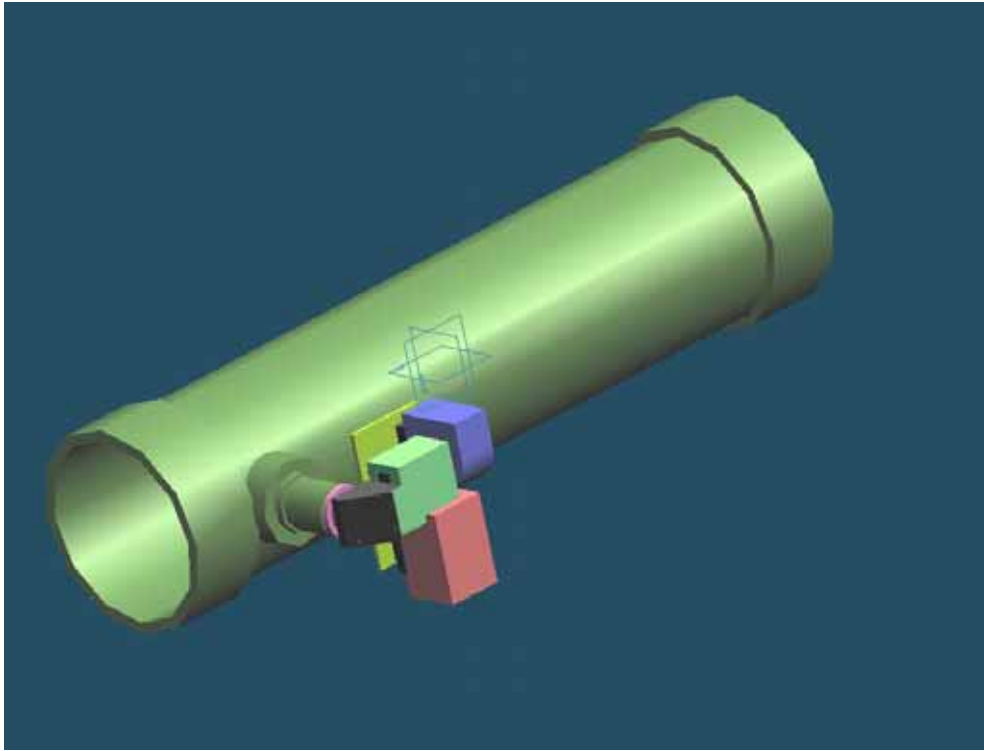


Figure 3-9 PB0680-140 フィルターの特性

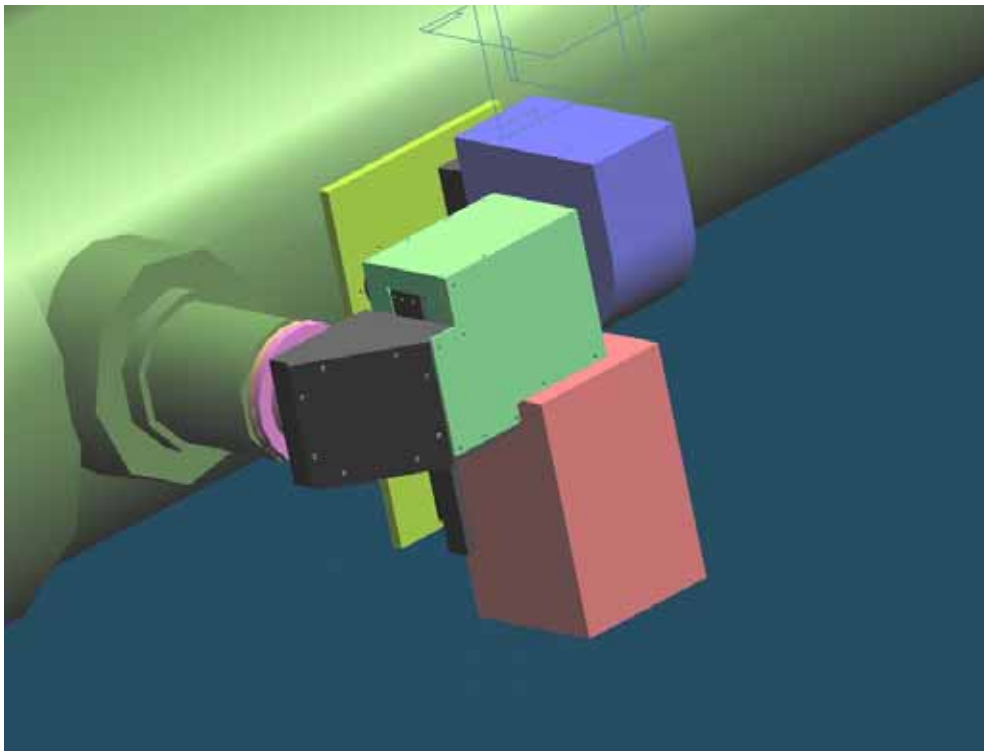
4. まとめ

4-1. SN見積もり

3.で行った設計をもとに, 望遠鏡, 補正系, 分光系を含むシステム全体での S/N を算出し, システムの性能評価を行う. システムの全体像を Figure 4-1 に示す. また, 算出した 1 ピクセルあたりの S/N を Figure 4-2 に示す. 実際には, いくつかのピクセルをビニングして S/N を向上させる. VIS では 4×4 ピクセルのビニング, NIR では 2×2 ピクセルのビニングを行う. また, NIR では 10 枚の画像をコンポジットすることで, さらなる S/N の向上をはかる. ビニングおよびコンポジット後の S/N を Figure 4-3 に示す. VIS では 600-1000 nm の全波長域にわたり, 十分な S/N を確保できる. NIR では大気によるスペクトル吸収の影響を受ける波長帯を除いて, 目標とする S/N 200 を達成できることがわかる.

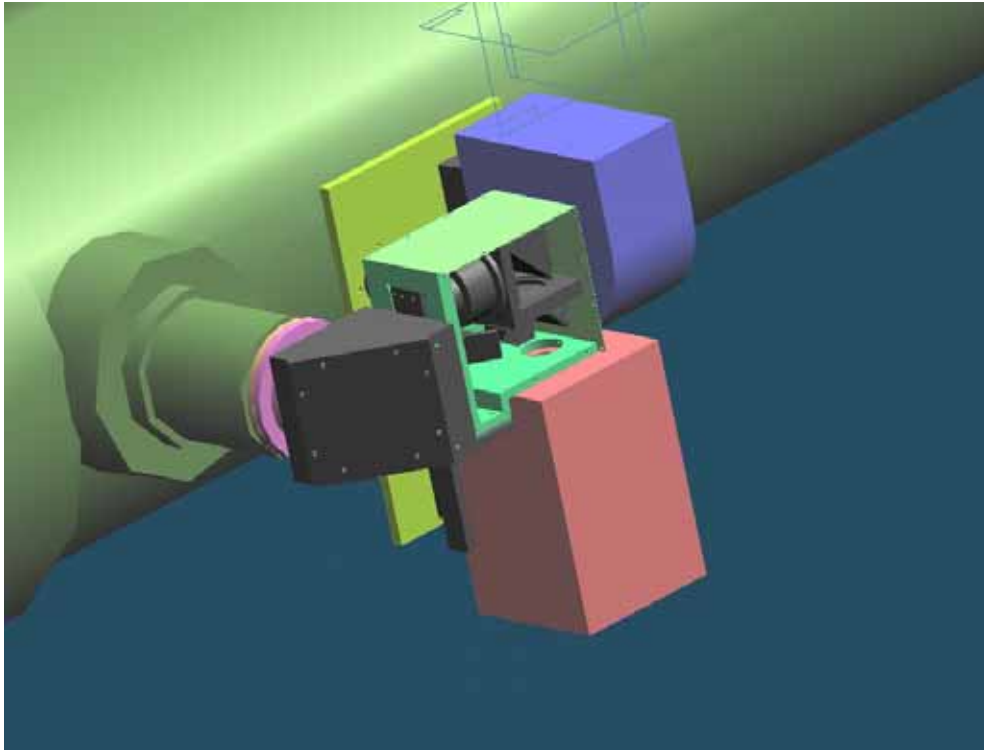


(a)

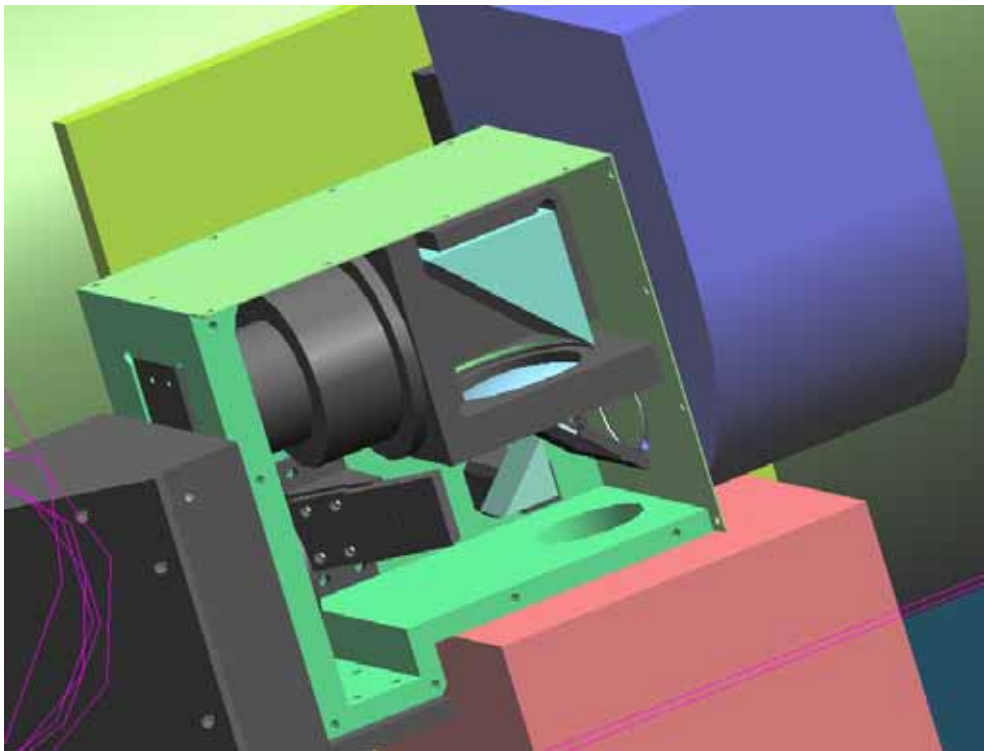


(b)

Figure 4-1 (a)システム全体像. (b)補正系(紫)・分光系(緑)・VIS カメラ(青)・NIR カメラ(赤)の配置図.



(c)



(d)

Figure 4-1 (c)分光系内部構造. (d) 分光系内部構造拡大図.

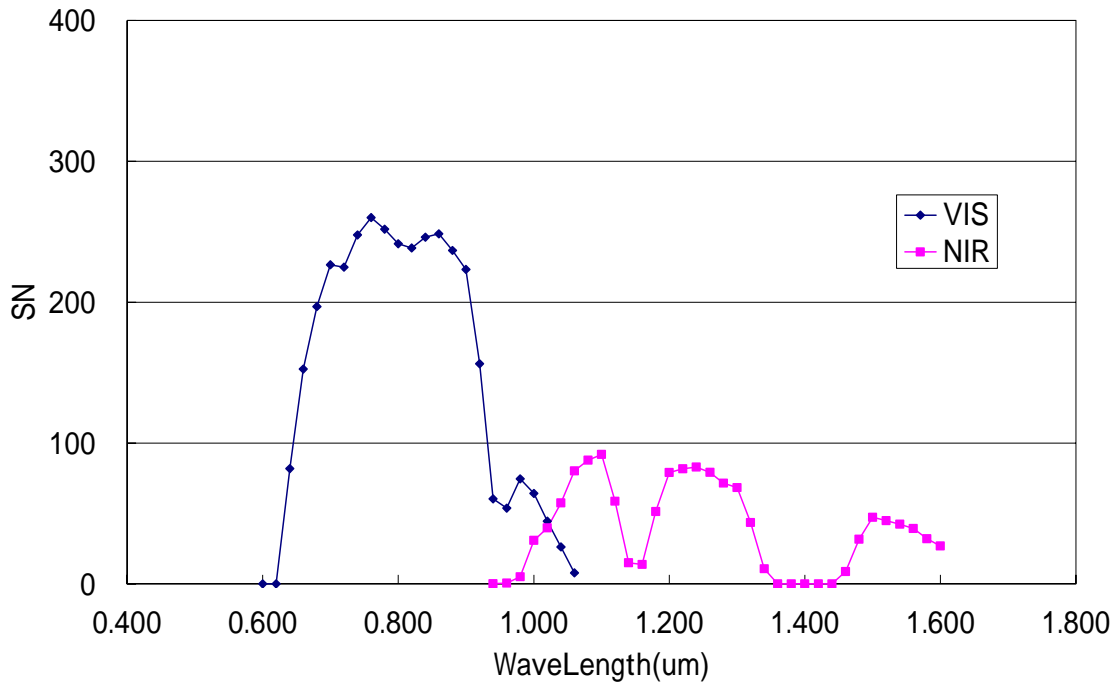


Figure 4-2 システム全体での 1 ピクセルあたりの S/N

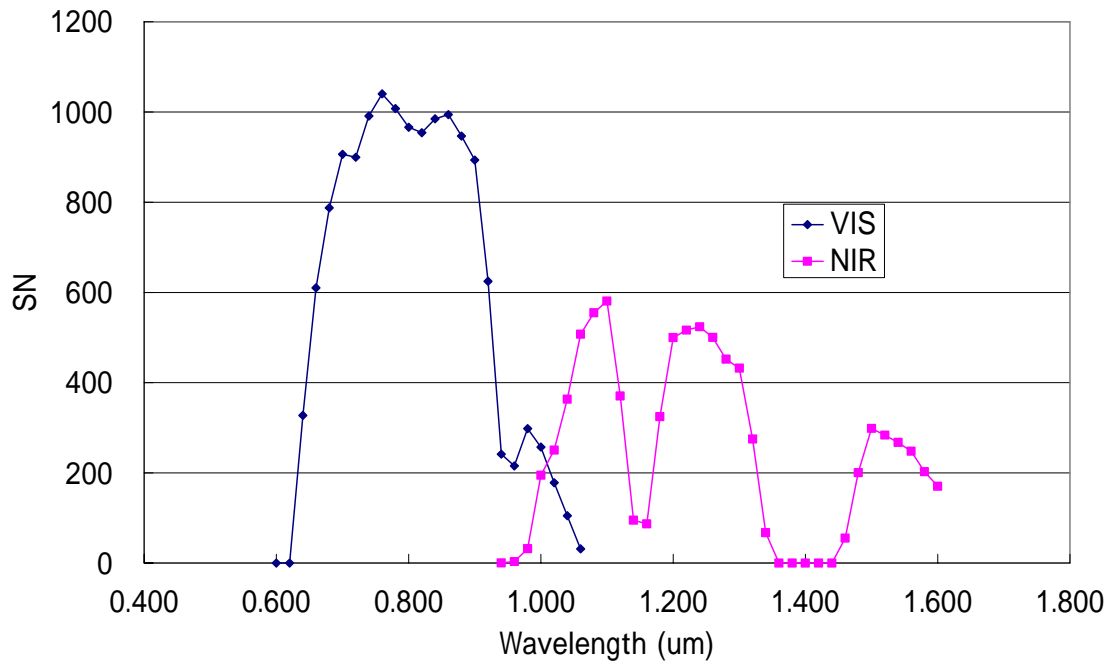


Figure 4-3 ビニング・コンポジット後の S/N

謝辞

本研究を進めるにあたり、適切なお助言ならびに懇切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(地学科)の高田淑子助教授に深く感謝いたします。

また、同大学地学科の青木守弘教授、川村寿郎教授、同物理科の千葉芳明教授には、日頃からご支援いただいたこと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様、株式会社ジェネシアの池田優二様、武山芸英様には、丁寧なご指導、ご助言をいただいたことに深く感謝いたします。

さらに、研究活動全般を通して、夜間の観測などさまざまなご協力、ご援助をいただいた同研究室の齋藤正晴君、佐々木佳恵さん、千島拓朗君に感謝いたします。