

月面連続分光撮像装置の性能評価

宮城教育大学 生涯教育総合課程

自然環境専攻

D7645 三浦 宏明

論文概要

目次

1. 序論

1-1. はじめに

1-1-1. 月

1-1-2. 月岩石・鉱物と反射スペクトル

1-1-3. 遠隔観測の意義

1-2. 研究目的

2. 連続分光撮像装置の仕様

2-1. 連続分光撮像装置概要と仕様

2-2. 分光部

2-2-1. スリット

2-2-2. 回折格子

2-2-3. ダイクロイックミラー

2-3. CCD 撮像部

2-3-1. CCD について

2-3-2. 位置確認撮像部の仕様

2-3-3. 可視撮像部(VIS)の仕様

2-3-4. 近赤外線撮像部(NIR)の仕様

3. 性能評価のための装置開発

3-1. 性能評価とは

3-2. CCD センサの清掃

3-3. 性能評価のための装置開発

3-3-1. 概要

3-3-2. 疑似集光系の設計

3-3-3. 装置設計

3-3-4. 撮像装置の構築

3-4. VIS、NIR の角度調整

4. 連続分光撮像装置の性能評価
 - 4-1. VIS、NIR の焦点位置調整
 - 4-2. VIS、NIR の波長対応調査
 - 4-2-1. スペクトル画像の中心調査
 - 4-2-2. 各スペクトル画像の傾き
 - 4-2-3. 波長、行、列の関数の導入
 - 4-2-4. 最小二乗法を用いた関数の導入
 - 4-3. VIS、NIR の空間対応調査

5. 結果とまとめ

参考資料

謝辞

1. 序論

1-1. はじめに

1-1-1. 月

月は地球唯一の衛星であり、人類が到達したことのある唯一の地球外天体である。地球からの距離は 38 万 4400km 離れており、半径 1738km、視半径 15'32.58"、地球の約 1/4 の大きさである。また、月の地震波測定から地殻やマントル、小さいながらも金属核といった内部構造をもつとされており(図 1-1)、月の歴史を知ることは地球を含む他の個体惑星の歴史を理解する上でも重要である[1][2]。

月の表側には光をあまり反射せず黒く見えることから、海と呼ばれている地域と光をよく反射し白く見える高地がある。海は月表面の約 35%を占めるが、月の裏側には海はほとんど存在しない。月は無数のクレーターに覆われていて、高地と海ではその数に違いがみられる。高地には大小さまざまなクレーターが数多く存在するが、海のクレーターの数は高地に比べて圧倒的に少ない。また、海には大きなクレーターも稀にしか存在しない。さらに、多くの海の場合、輪郭が円形を成していることから大型のクレーターや 200~400km を超える大規模なクレーターである衝突盆地の中を隕石衝突後、染み出た溶岩が埋るようにして形成されたとされている。この溶岩は Fe および Mg に富む粘性の低い玄武岩質のものであるが、地域や年代によって Ti の含有量の異なる溶岩流が知られている[2]。

海以外の部分(高地)は、隕石の衝突により破砕混合された角礫岩から構成されている。月には大気がほとんど存在しないため、地球では流星となるような微小な隕石も燃え尽きることなく月面に衝突しており、月全体が数多くのクレーターによって覆われている。高地は Ca、Al に富む斜長石から構成されているため明るい色を呈している(図 1-2)[2]。

月は鉱物の放射年代測定により約 45 億年前に誕生したことが分かっている。その起源についてはいくつかの説がある。他の場所でほぼ形成され彷徨っていた月を地球が捕獲したとされる捕獲説、地球の自転による遠心力によって地球から月が分裂したとされる分裂説、地球と同時期に月が地球と同じように形成されたとされる兄弟説などである。1976年に提唱されたジャイアントインパクト(衝突起源)説が現在では最も有力なものとなっている。この説は、原始地球に現在の火星ほどの大きさの天体が斜めに衝突し、原始地球から大量の破片が剥がれ落ち、その後それらの破片によって月が形成されていったという説である。

月面の情報を得るために人類は望遠鏡の地上観測に始まり、今日の月探査機による月面撮像を行ってきた。人類史上初めて月を目指した探査機である旧ソビエト連邦の Luna 計画をはじめ、アメリカでの Pioneer 計画、Lunar Orbiter 計画、Apollo 計画など多くの月面探査が 1980 年代までに行われてきた。しかしながら、月の鉱物のサンプルリターンは局地的なものではしかなかったため 1990 年代以降の探査では、全球の構成岩石の分布を理解する

ためのリモートセンシング探査に重点が置かれるようになった。1990年代のリモートセンシングの代表としてアメリカの Clementine 計画(1994)と Luna Prospector 計画(1998～1999)がある。Clementine 計画は月の高緯度地方を調査することと、月面全体の地形・地質情報を収集しその資源量を見積もることを計画したもので、月周回によるリモートセンシング調査がなされた計画であった(図 1-3)。Luna Prospector 計画は月面だけではなく月の内部の調査も行った[3][4]。

現在日本でもリモートセンシングによる月探査行われている。2007年9月14日に月周回衛星「かぐや」(SELENE; Selenological and Engineering Explorer)は月の起源と進化を解明するためと将来の月利用のための調査を目的として打ち上げられた。現在も月周回軌道(高度 100km)を回りながら元素分布や鉱物分布、地形・表層構造、重力分布などの調査・観測をリモートセンシング探査で続けている。SELENEはApollo計画以降、最大の月探査計画といわれている[3]。

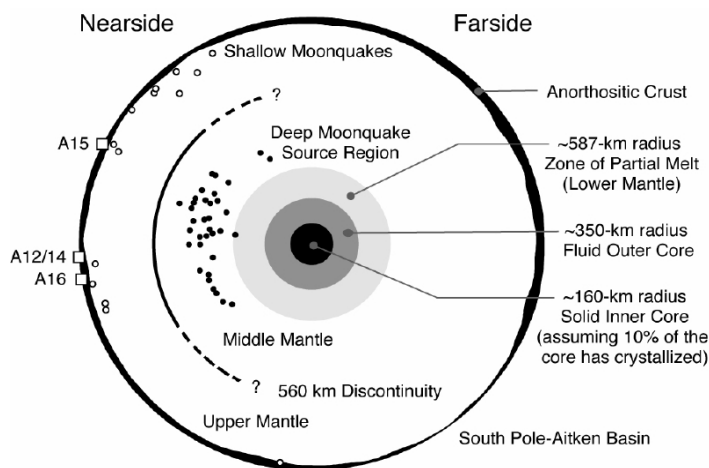


図 1-1. 月の内部構造
[M.A.Wieczorek]



図 1-2. 月の高地と海の比較
[2008/12/10 撮影]

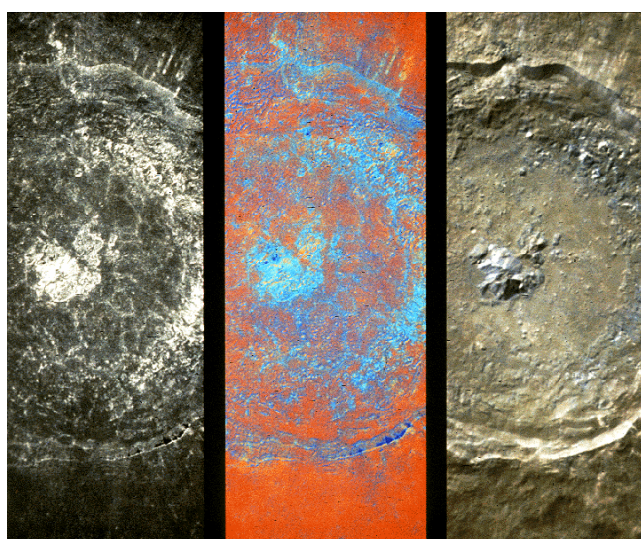


図 1-3. Clementine による月面のスペクトル画像
左: 750nm/1000nm の比演算画像
中央: 赤 750nm/450nm
緑 750nm/1000nm
青 415nm/715nm
のフィルタをそれぞれ使用し撮影したものを合成した画像
右: RGB 合成画像
[NSSDC/NASA]

1-1-2. 月岩石・鉱物と反射スペクトル

月の高地の岩石は斜長石($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{-NaAlSi}_3\text{O}_8$ の固溶体)が主要構成物であるため乳白色をしている(図 1-2)。また、斜長石に加えて、苦鉄質鉱物(斜方輝石($(\text{Fe,Mg})_2\text{Si}_2\text{O}_6$)や単斜輝石($\text{Ca}(\text{Mg,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$)、カンラン石($(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$)など、Fe や Mg に富む鉱物を比較的多く含む岩石も発見されている。このような岩石は、全岩石組成が Mg に富むため、Mg 系列岩類と呼ばれている。Apollo 試料による高地の岩石は深成岩であることから月の地殻を構成している岩石であると考えられている。

一方、月の海は火山岩である玄武岩から構成されているため暗黒色をしている。このことから、月のマントルが融解することによって生成した流動性の高いマグマが噴出し、隕石の衝突によって形成された盆地の中を覆ったものが海であると考えられている。

もうひとつ、月の地殻物質として重要なものに KREEP 質岩石がある。この岩石グループは、岩石中に含まれる ppm の濃度しかない微量元素組成を調べて初めてその特徴が理解できるものである。KREEP とは K(カリウム)、REE(Rare Earth Elements;希土類元素)、P(リン)といった元素に富む岩石グループと定義されている。特に月面の表側中心部には高 Th 濃度地殻がリモートセンシングによって発見され Procellarum KREEP Terrain (PKT) と呼ばれている[5][6]。

リモートセンシングによる鉱物の同定にはスペクトル特性を利用する。スペクトル特性とは物質のそれぞれ固有に電磁波を反射、吸収する性質であり、太陽光の反射を分光分析することで鉱物の同定をすることができる。月岩石のカンラン石、輝石、斜長石のスペクトル特性を図 1-4 に示す。たとえば、カンラン石、輝石は岩石中に含まれる Fe^{2+} が可視・近赤外線領域の光を吸収することで反射スペクトルに特徴的な曲線が生まれる[7]。

図 1-4 は Apollo 試料から各鉱物を取り出した時の単体での反射スペクトルであり、実際の反射スペクトルは鉱物の混合などによる影響を受け複雑に変化する。また、月は地球と違い大気がないため、微小隕石や宇宙放射線が絶えず降り注ぎ、岩石表面にガラス質粒子が生成され、反射スペクトルに影響を及ぼしてしまう(図 1-5)。この影響のことを Space weathering(宇宙風化)と呼ぶ。さらに、鉱物の粒径のサイズによって反射スペクトルが少し変化することも分かっている(図 1-6)。サイズが変わっても結晶構造は同じなので吸収帯の位置は変わらないが、サイズが大きいほど全体的な反射率は低下し、吸収帯の相対的な深さは増加する[8]。

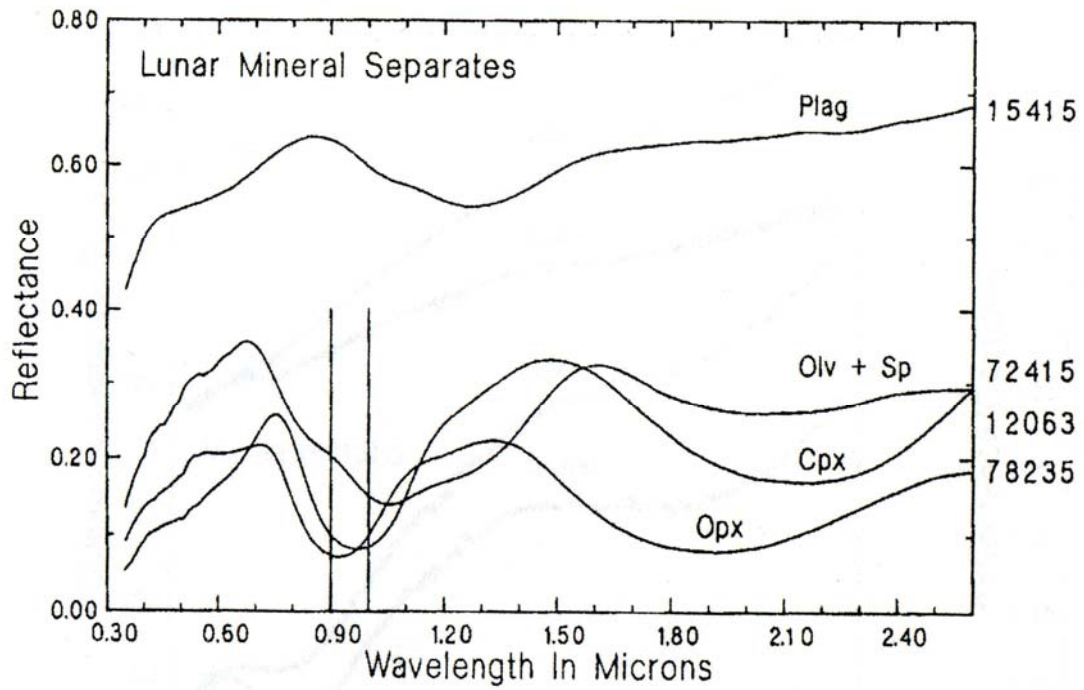


図 1-4. Apollo 試料に含まれる各鉱物の反射スペクトル

Plag(斜長石) Oliv+Sp(カンラン石+スピネル)

Cpx(単斜輝石) Opx(斜方輝石) [9]

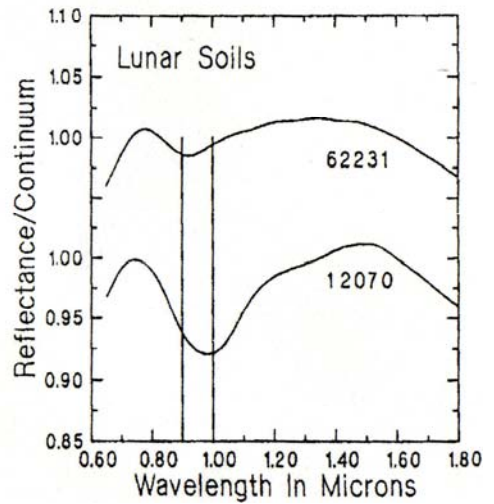
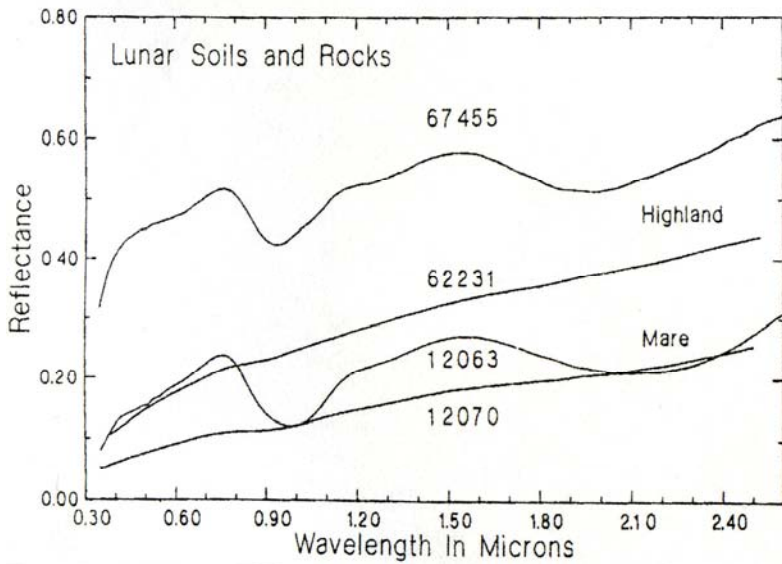


図 1-5. 月の岩石とレゴリスの反射スペクトル(左)

[9]

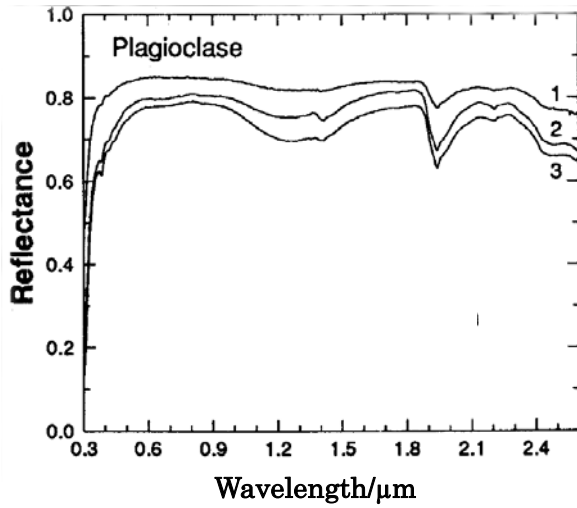
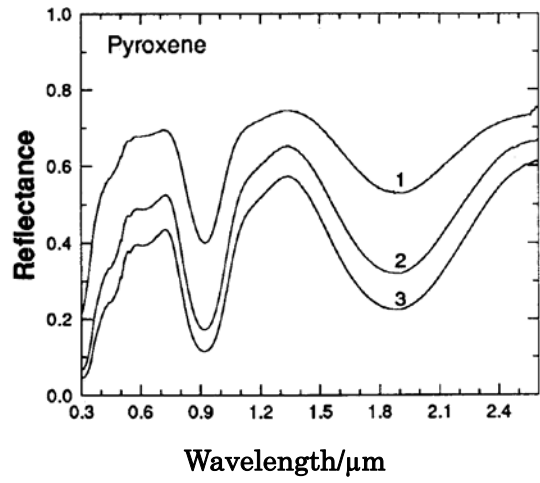
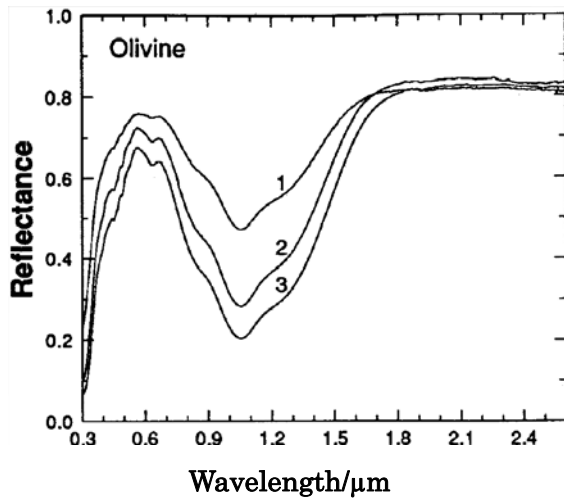


図 1-6. 鉱物の粒径の違いによる反射スペクトルの変化
 カンラン石(左上)、輝石(右上)、斜長石(左下)、
 粒径サイズ 1 : 25 μm 以下 2 : 25~45 μm 3 : 45~75 μm
 [10]

1-1-3. 遠隔観測の意義

リモートセンシングとは、離れた所から直接触れずに対象物を同定、測定、性質分析を行う技術である。リモートセンシングにおける対象物の情報収集には、対象物からの反射(reflection)、または放射(radiation)される電磁波が主として用いられる。

すべての物体は、それぞれ固有の性質として電磁波を反射、吸収、透過及び放射する。この波長特性を分光特性(スペクトル特性)と呼ぶ。この分光特性を、電磁波などを受け取る装置であるリモートセンサ、つまりカメラによって撮像、分析することで物質を同定することができるのである。

すべての物体は、種類及び環境条件が異なれば、異なる電磁波の反射、放射の特性を有するという電磁波特性からリモートセンシングは物質の識別やそれが置かれている環境を把握する技術であるともいえる[7]。

本研究で使用する月面連続分光撮像装置もリモートセンシングに活用でき、月面での反射光を分光撮像することが可能である。

本研究で使用する連続分光撮像装置には VIS(Visible)と NIR(Near Infra Red)の2種類のセンサを利用している。この2つのセンサは共に CCD で、本研究の VIS は 600~1000nm の、NIR は 900~1600nm の波長領域でスペクトル画像を取得する。

1-2. 研究目的

これまで、本研究で使用する月面連続分光撮像装置による月面の撮影は行われてきた[齋藤 2005]。しかし、装置のスペクトル画像の傾きの考慮や波長空間対応の微調整が行われなかったために月面鉱物調査の解析に至るまでのデータ取得まで至っていなかった。本研究ではスペクトル画像の傾きや波長空間対応、空間位置対応を調査・調整することで月面鉱物調査をするための撮像可能な装置性能評価・調整を行った。装置の性能評価・調整は月面連続分光撮影時の精度を高め、より正確な月面分光撮像データの取得のために重要である。特に扱うデータが 10^{-6}m 単位という精密なものであるため、正確な性能評価と調整が求められる。この調整によって月面連続分光撮像を行い、分析を行うことで月表面の進化についての理解を深めることができる。

2. 連続分光撮像装置の仕様

2-1. 連続分光撮像装置の概要と仕様

月面撮像時の全体像はおおきく分けて天体望遠鏡と連続分光撮像装置に分けられる(図 2-1)。天体望遠鏡は集光部、駆動部に分けられ、撮像装置は分光部、位置確認撮像部、可視撮像部(VIS)、近赤外線撮像部(NIR)に分けられる。

集光部には、ニュートン式天体望遠鏡(高橋製作所 MT300)と F 値補正レンズ(F5.5 補正)を使用する。駆動部にはドイツ式赤道儀(高橋製作所 EM500)を使用する。

分光部は集光部から入ってきた光をスリットに通し、回折格子によって分散させ、ダイクロミックミラーを使用することによって可視光領域と近赤外線領域に分離、各スペクトルを VIS と NIR に結像させるシステムである。

位置確認撮像部には、Web Camera (Phillips 社製 ToUCam-Pro)を使用する。スペクトル画像だけでは月の撮像地域がわからないためスリット部分に鏡を使用しスリットを通らず反射した光を位置確認撮像部に結像させるシステムである。

本研究の分光撮像では月の鉱物の反射スペクトルにあらわれる特徴的な吸収帯が 950nm 付近に存在する(図 1-4 参照)ことから 600~1600[nm]の波長領域のスペクトル取得を目的としている。撮像部には[松下 2004・齋藤 2005]の連続分光撮像装置を用いることとする。この撮像装置は VIS (SBIG 社製、ST-7E、Si-CCD センサ)と NIR (SU I 社製、SU320-1.7RT-D、InGaAs-CCD センサ)の 2 台を用いることによって 600~1600nm という広範囲の波長領域でのスペクトル取得を可能にしたものである[14]。

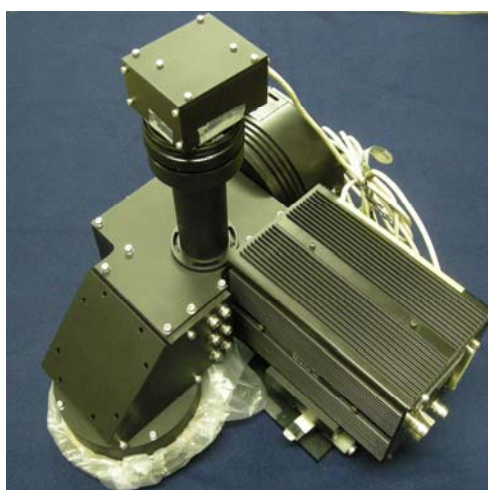


図 2-1. 天体望遠鏡(左)
連続分光撮像装置(右)

2-2. 分光部

2-2-1. スリット

分光部に光が入った時に最初に通るのがスリット(slit)である。スリットは対象天体の周辺の光を遮断することによって、センサ上でスペクトルに重なり得る光のスペクトルを除くことができ、S/Nの向上につながる。スリット幅により波長分解能が決まる。一般的にカメラ上でのスリット像が2~3pixに対応するようにスリット幅を決定する。撮像装置では分光部における拡大率は1になるように設計するため、スリット幅がNIRカメラの2画素に対応する仕様となっている。NIRカメラの実質の画素サイズは28 μm であるが、画素間サイズ(pitch size)は40 μm であるため、スリット幅は2画素間長分の80 μm としている。

2-2-2. 回折格子

紫外~赤外線領域の分光観測では回折格子(grating)が多く使われている。本研究の装置にも回折格子が使用されている。本研究での近赤外線領域における目標波長分解能はNIRで10nm/画素と設定されている[13]。

2-2-3. ダイクロイックミラー

ダイクロイックミラー(dichroic mirror)とは、特殊な光学素材を用いて作成された鏡の一種で、特定の波長の光を反射し、その他の波長の光を透過するものである。本研究での撮像装置におけるダイクロイックミラーは、可視領域の光を反射させVISカメラで検出し、近赤外領域の光を透過させNIRカメラで検出する仕組みで切り換え中心波長は950~1050nmである[14]。



図 2-2
装置の内部図

2-3. CCD 撮像部

2-3-1. CCD について

CCDとはCharge Coupled Deviceの略称で固体撮像素子の一つである。多くの画素を持ち、各画素に蓄えられる光情報を取り出すため（受けた光を電子に置き換え、その強度に比例した数の電子を蓄えることができる。）、画素ごとの信号電荷を結合しながら転送する構造のイメージセンサである。

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。

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、

$$E = \frac{h[J \cdot s]c[m/s]}{\lambda \times 10^{-9}[m]} = \frac{hc}{\lambda} \times 10^9 [J] \quad (2-1)$$

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] とすると、

$$N_p = \frac{W}{E} = W[W(J/s)] \times \frac{\lambda \times 10^{-9}[m]}{h[J \cdot s]c[m/s]} = W \times \frac{\lambda \times 10^{-9}}{hc} [s^{-1}] \quad (2-2)$$

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、

$$I = e[C(A \cdot s)] \times N_c[s^{-1}] = eN_c[A] \quad (2-3)$$

の関係から、量子効率は、

$$\eta = \frac{N_c}{N_p} = \frac{I[A]}{e[C]} \times \frac{h[J \cdot s]c[m/s]}{W[W(J/s)]\lambda \times 10^{-9}[m]} = \frac{hc}{e} \times \frac{I}{W\lambda} \times 10^9 \quad (2-4)$$

$$\therefore \eta = 1240 \times \frac{I}{W\lambda} \quad (2-5)$$

この値が高いほど、高感度であるといえるのである [15]。図にVIS、NIRの量子化効率を示す。図からVISは350nm～1050nmにNIRは900nm～1700nmに感度があることがわかる。

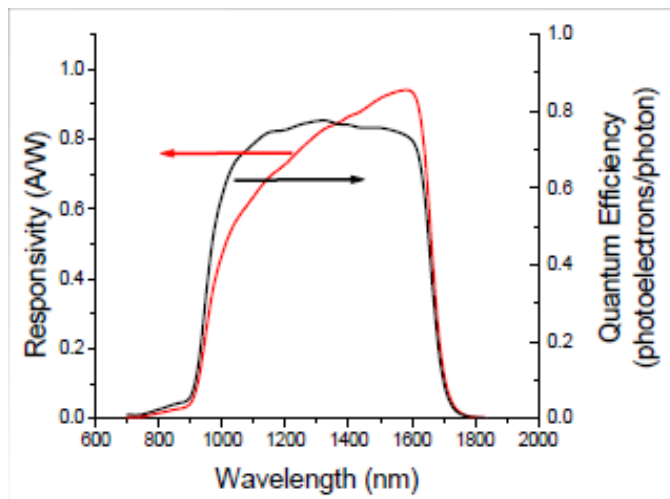
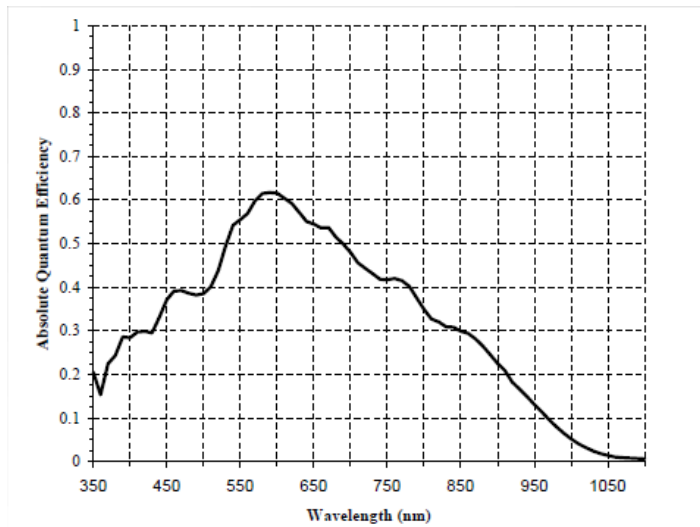


図 2-3

VIS(上)と NIR(下)の量子化効率

[16][17]

2-3-2. 位置確認撮像部

スペクトル画像だけでは月の撮像地域がわからないため、スリットを通らなかった光を反射させ位置確認撮像部で撮像することで撮像部分の確認を行う。位置確認撮像部には Philips 社製 ToUCam Pro を使用している。ToUCam Pro に使用されている CCD は SONY 社製 ICX098BQ である。

補正レンズ付きの望遠鏡に ToUCam Pro を付けたとき ($f=1650\text{mm}$ 、 $F=5.5$) の画角は $7'28'' \times 5'36'' (0.7''/\text{pix})$ 、月面分解能は $865 \times 649\text{km} (1.35\text{km}/\text{pix})$ となる [松下 2004]。一方、VIS の月面分解能は $4.5\text{km}/2\text{pix} (2.25\text{km}/\text{pix})$ である。つまり、ToUCam Pro は VIS の 1.66 倍の分解能を持っている。ToUCam Pro の焦点距離を $1/1.66$ 倍して VIS と同等の分解能とするような $f=990\text{mm}$ 、 $F=3.3$ 光学系ユニットが装着されている (図 2-4)。



図 2-4. 位置確認撮像部

2-3-3. 可視撮像部(VIS)の仕様

600～1000nmの可視・近赤外線範囲においてはSBIG社製ST-7Eを使用している。ST-7Eを使用しているCCDはKodak社製KAF-0401Eである。Kodak社製KAF-0401Eの性能は表2-1のとおりである。露出時間は0.01sec刻みで0.11～3600secまで調節可能である。センサからの出力はA/Dコンバータにより16bitに変換され、 2^{16} (65536)段階の輝度値で表示される。CCDカメラでは、光入力のない状態でも信号出力暗電流がありノイズの原因の一つとなる。これは、温度が高いほど大きな影響があるため熱雑音とも呼ばれる。CCDを冷却することによってこの熱雑音を減らし、低ノイズの画像を得る。CCDの冷却には、ペルチェ素子による冷却が用いられるCCDの冷却は霜防止のためゆっくり時間をかけて行う必要がある。ST-7Eは付属ソフトCCDOPSによって撮像から温度設定、露出時間調節などすべての制御をおこなうことができる。CCDの制御についてはPCに搭載されているCCDOPSというCCD制御ソフトを使用する[16]。



図 2-5. ST-7E

CCD	Kodak KAF 0401E
CCD サイズ	765×510pixel 6.9×4.6mm
総ピクセル数	390000pixels
ピクセルサイズ	9×9μm
量子効率	30%～70% at 450～850nm
フルウェルキャパシティ	～100000e ⁻
ダークノイズ	1e ⁻ /pixel/sec at 0℃
露光時間	0.11～3600sec 0.1sec 単位
A/D コンバータ	16 bit
読み出しノイズ	15e ⁻ RMS
ビニング数	1×1、2×2、3×3

表 2-1. VIS の仕様 [16]

2-3-4. 近赤外線撮像部(NIR)の仕様

NIR は 1000~1600nm の近赤外線領域において、SU Inc.社製 SU320-1.7RT-D を使用している。SU320-1.7RT-D の使用している CCD は SU Inc.社製 SU320-1.7TI である。SU Inc.社製 SU320-1.7TI の性能は表 2-2 のとおりである。900~1700nm の波長領域で感度を持つ。冷却機能はペルチェ素子の 1 段冷却によって 291K(18℃)に一定に保たれるため、外部の冷却装置は必要ないが、これ以上冷却できないのでノイズをこれ以上減らすことができない[17]。

PC に取り込んだデータは、NI 社製の計測制御ソフト 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。

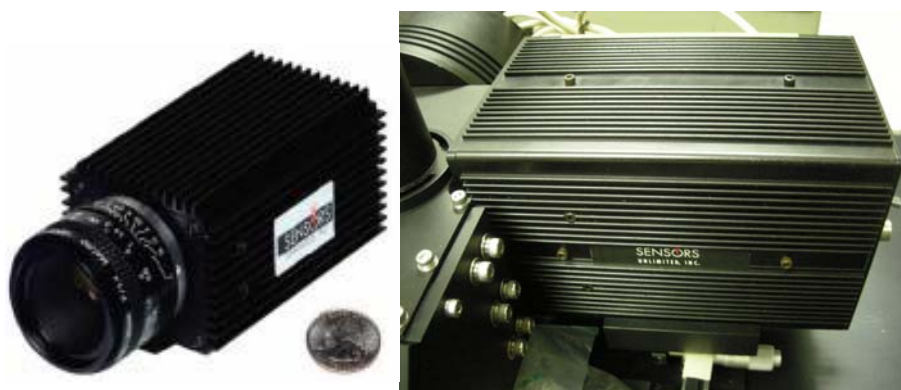


図 2-6
SU320-1.7RT-D

CCD	SU Inc. SU320-1.7RT-D
CCD サイズ	320×240pixel 12.8×9.6mm
総ピクセル数	76000pixels
ピクセルサイズ	28×28μm (pitch 40×40μm)
量子効率	70% at 1000~1600nm
フルウェルキャパシティ	~1000000e ⁻
露光時間	0.127~16.27msec 8段階調整
A/D コンバータ	12 bit
読み出しノイズ	1000e ⁻ RMS

表 2-2. NIR の仕様
[17]

3. 性能評価装置の開発

3-1. 性能評価とは

本研究で行う連続分光撮像装置の性能評価は以下のものを行う

1. 各検出器(VIS,NIR)の焦点位置調整
2. VIS、NIR の波長対応調査
3. VIS、NIR の空間対応調査

連続分光撮像装置の性能評価は今後、月面撮像時に正確なデータを取得するために行うものである。連続分光撮像装置は[松下 2004][齋藤 2005]で月面を撮像したが、VIS、NIRの傾きや波長対応、空間対応などの微調整を残したままだったので満足のいく結果ではなかったようだ。そこで、本研究において数年保管状態にあった連続分光撮像装置の性能を調査するとともに微調整を繰り返し、月面撮像に適した性能へと近づけることとした。

3-2. CCD センサの清掃

撮像装置を組み立てた際に CCD 部に汚れが付着し、画質が劣化していた。そこで、CCD センサの清掃を行った。清掃に使用したのはエアダスト(シグマ光機株式会社製 Dust Off Plus)とレンズクリーナー(シグマ光機株式会社製 オプティクスクリーニングキット)(図 3-1)である。エアダストによってレンズに傷がつかないように CCD 面に付着した汚れや埃を取り除き、さらに有機溶剤でエアダストでも取れなかった汚れや埃をふきとった。



図 3-1

エアダスト(右上)とレンズクリーナー(左上)

3-3. 性能評価のための装置開発

3-3-1. 概要

装置には連続分光撮像装置、集光系、光源、PC(3台)、連続分光撮像装置を平行移動させるためのXYステージが主に必要である。これらの全体図を図3-2、3-3に示す。

性能評価をするにあたって、実験室内で望遠鏡のような大きな光学系を使用することはできない。そこで、観測時と同様の $F=5.5$ の疑似集光系を製作した。

光源には直径 $50\mu\text{m}$ のピンホールを考慮し十分な光量を確保できる懐中電灯を使用した。懐中電灯の光量が不安定なため一定の光量を得ることができない。そこで、Hgランプを使用した。Hgには特徴的な輝線が現れるため、波長空間対応調査で使用する。Hgランプの光源の位置は $155\sim 415\text{mm}$ の範囲で上下移動ができる。

連続分光撮像装置の平行移動にはXY軸ステージ(シグマ光機株式会社製)を使用する。このXYステージは微調節ねじにより $10\mu\text{m}$ 単位での調整が可能である。

VIS、NIR、位置確認撮像部はそれぞれPC1(IBM)、PC2(EPSON)、PC3(SONY)に接続し画像の取得を行う。PC1にはVIS画像取得のためのソフトCCDOPSが、PC2にはNIR画像取得のためのプログラムソフトLabVIEWがそれぞれ内蔵されている。

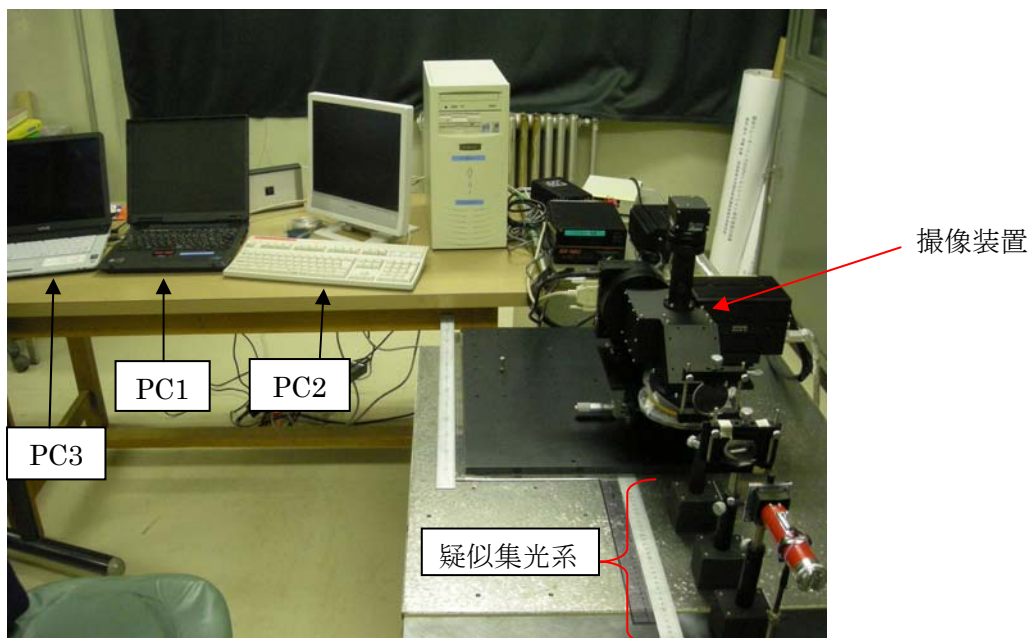


図3-2. 装置全様

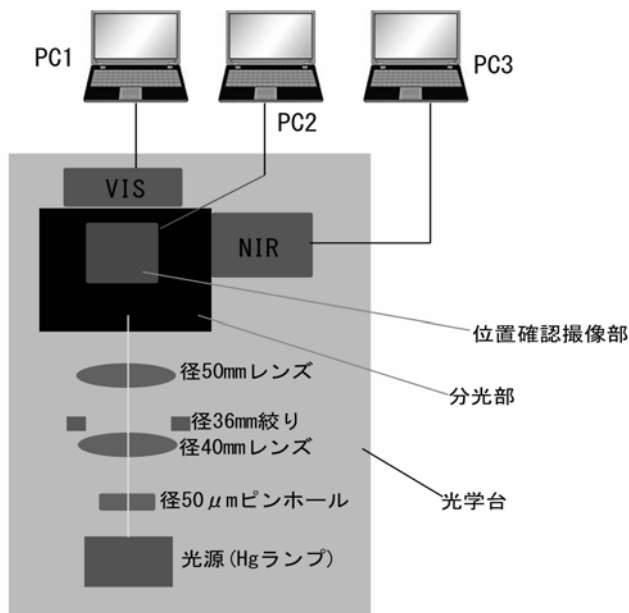


図 3-3
装置全体図

3-3-2. 疑似集光系の設計

疑似集光系には、直径 50mm(焦点距離 200mm)レンズ、直径 40mm(焦点距離 100mm)レンズ、直径 50 μ m のピンホールを使用する。散乱光をピンホールから出し、径 40mm のレンズを通して平行光とする。平行光を F5.5 で集光するために径 36mm の絞りを設計した。F 値は焦点距離を口径で割ったものである。つまり、(口径)=(焦点距離 200mm)/(F 値 5.5) となるため絞りを 36mm と決定した。ピンホールの大きさはスリット幅 80 μ m に入る大きさの 50 μ m を使用する。図 3-4 に設計を示す。

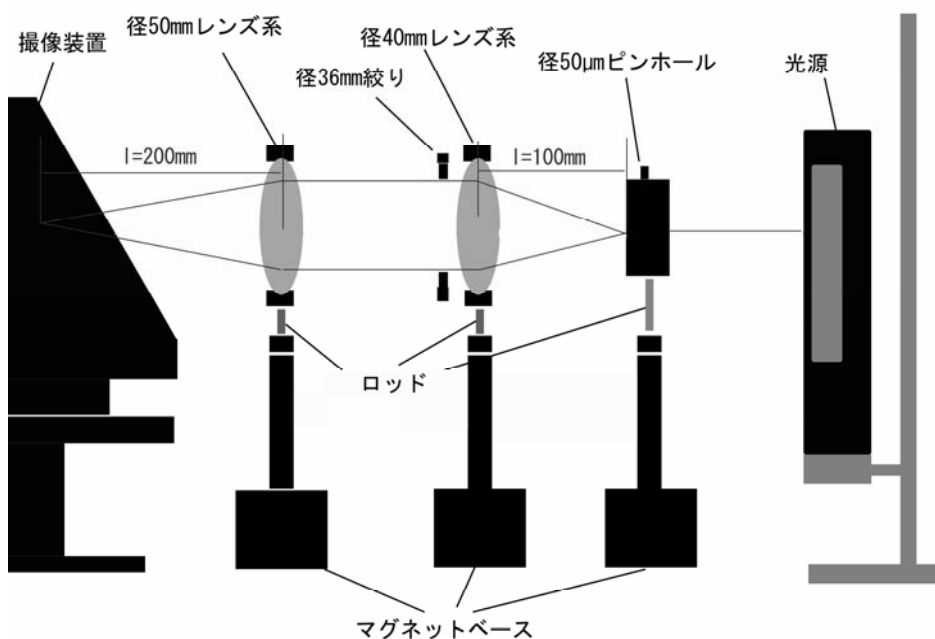


図 3-4
疑似集光系の設計

3 - 3 - 3. 装置設計

光学台上で撮像装置のスリットと疑似集光系の光軸の高さが合うように撮像装置と疑似集光系の高さ調節を行った。撮像装置と疑似集光系の設置方法として以下の試案を考慮し、必要機器を洗い出す。

試案 1.

撮像装置に疑似集光系の光軸を合わせる。

試案 2.

撮像装置の高さを疑似光学系の光軸に合わせる。

試案 1 については疑似集光系のロッドの高さを 80mm から 30mm 仕様に変えても光源の最小値(155mm)を変えることができない。光源を斜めにすれば問題はないが、斜めの状態で固定することは困難で、また光源が安定しないと点光源がぶれてしまい正確な結果を得ることができないので試案 1 については却下とした。

試案 2 を考察するにあたって疑似集光系のロッドの高さを考慮しなければならない。集光系の高さはロッド長により 175~215mm に制約される。図 3-5 のようにピンホールは 165~215mm まで、径 40mm レンズ系は 170~220mm まで、径 50mm レンズ系は 175~225mm までロッドによって高さを変えることができる。よって、最小値は径 50mm レンズの高さ 175mm、最大値はピンホールの高さ 215mm となる。つまり撮像装置の底からスリットまでの高さ(90mm)と使用する部品の高さが合計で 175~215mm の間に収まらなければならない。これを下回ったり、上回ったりすれば光源はスリットに入らない。

使用する部品を表 3-1 に示す。

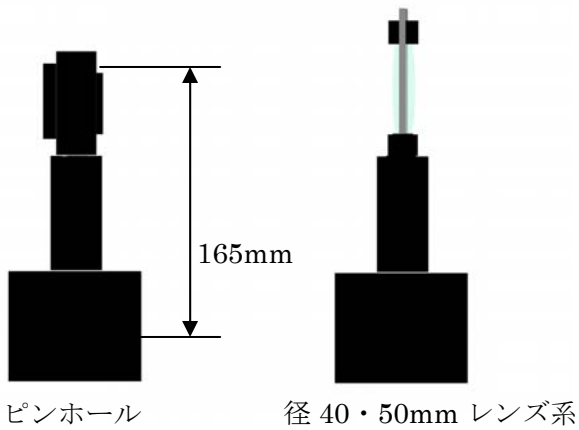
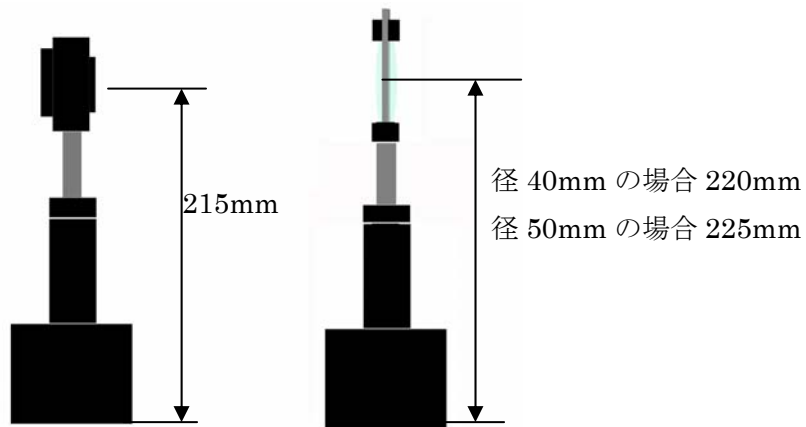


図 3-5

疑似集光系におけるピンホールとレンズ系の高さの最大値(上)と最小値(下)

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> i. XY 軸ステージ (高さ 42mm) ii. ベース (高さ 15mm) iii. 大型マグネットベース (高さ 80mm) iv. ロッドスタンド+ロッド (高さ 51mm~75mm まで変換可能) v. スペーサー① (高さ 7mm) vi. スペーサー② (高さ 7mm) vii. スペーサー③ (高さ 10mm) viii. M16P1 M8P1.25 変換スペーサー (高さ 10mm) ix. 高さ調整スペーサー (高さ 44mm) |
|--|

表 3-1. 装置設計に使用する部品

※図 3-6~11 参照

※vi~ixについては未所有部品。

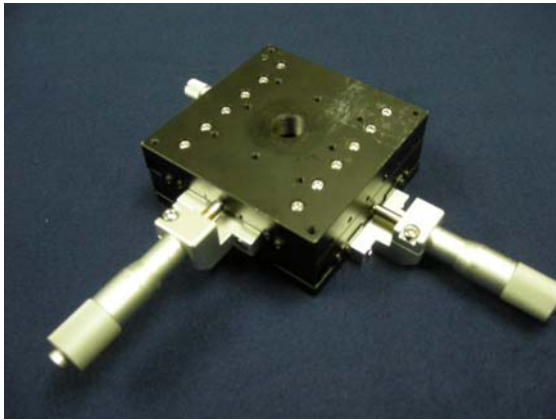


図 3-6. XY 軸ステージ

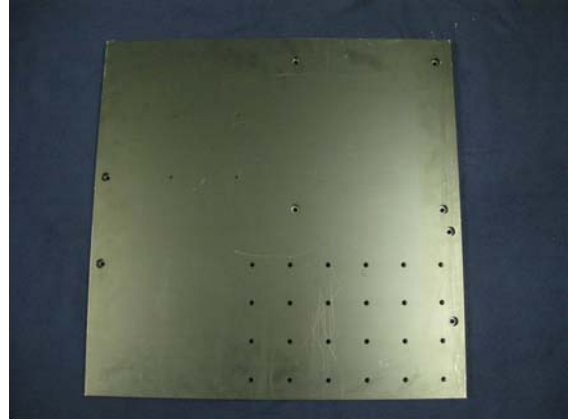


図 3-7. ベース

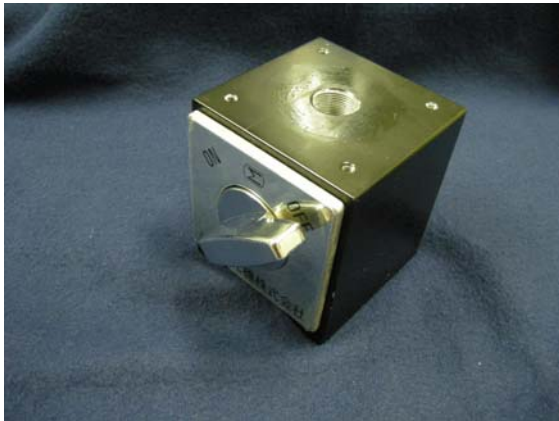


図 3-8. 大型マグネットベース



図 3-9. ロッド+ロッドスタンド



図 3-10. スペーサー①

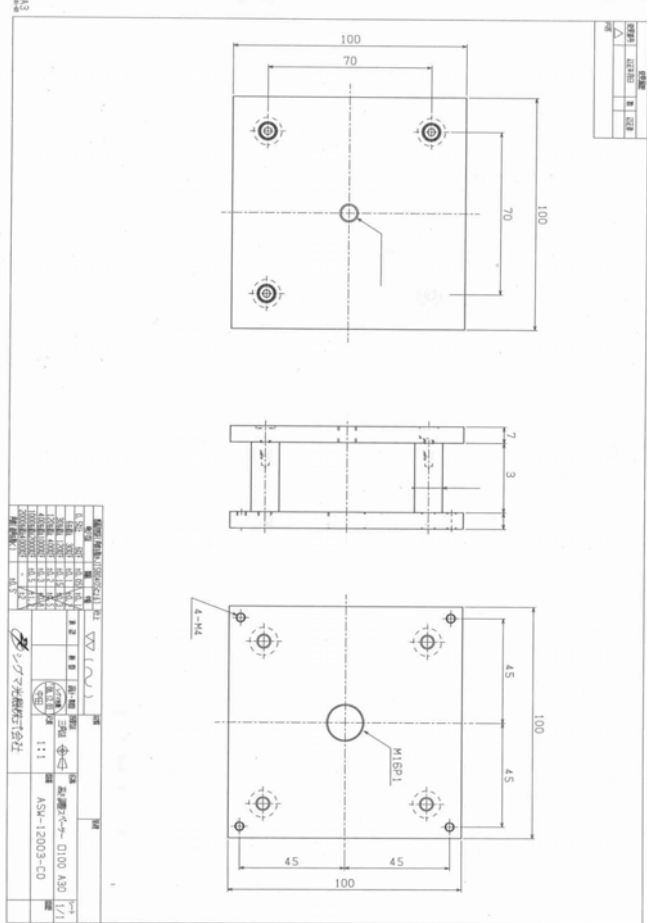
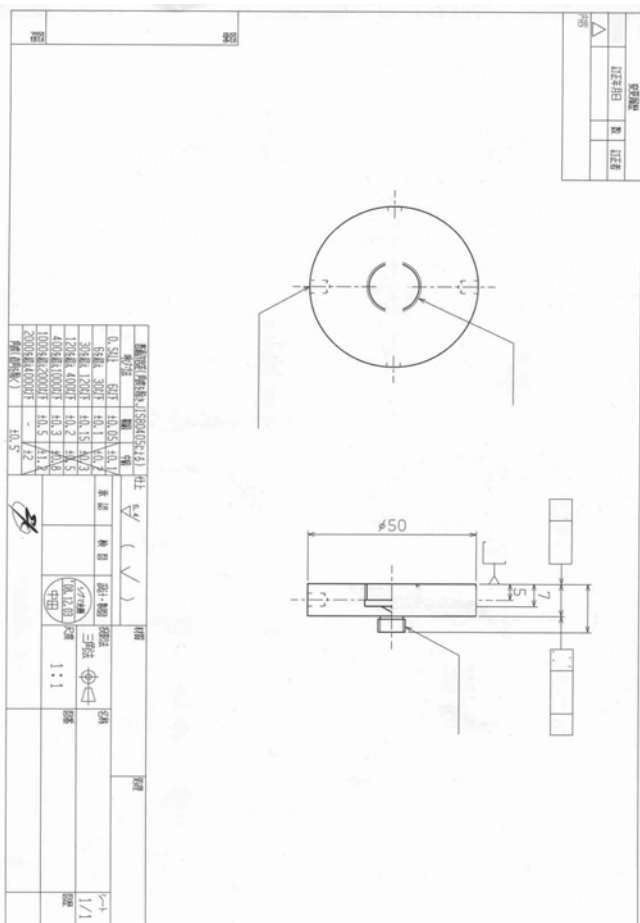
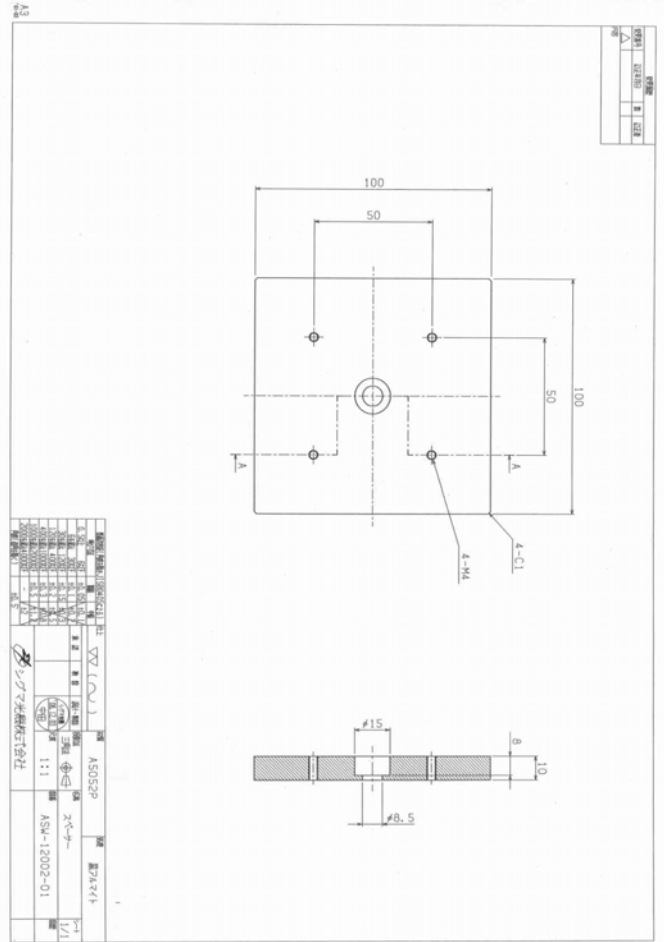
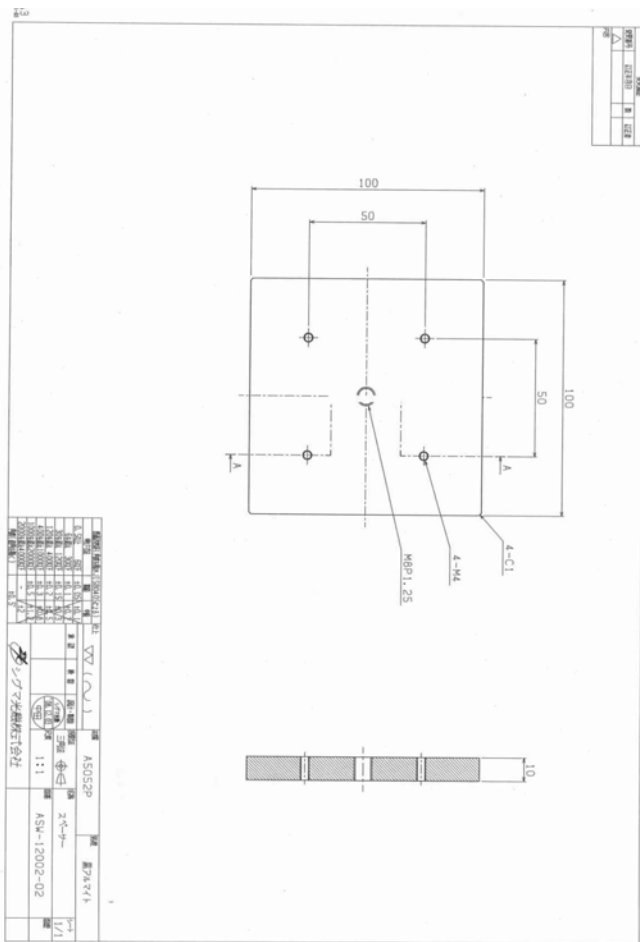


図 3-11

スペーサー②(左上)、スペーサー③(右上)、

M16M8 変換スペーサー(左下)、高さ調整スペーサー(右下)の設計図 [シグマ光機株式会社]

前記の部品を使用した場合の試案を以下に示す。

・試案 2-1. 大型マグネットベースを使用した場合

マグネットベースは高さ 80mm で間にロッドスタンド+ロッド(51mm)、XY 軸ステージ(42mm)を設置し撮像装置のスリットの高さ(90mm)を合わせると高さ 263mm と最大値を大きく超えてしまうのでこの案は却下とした。

・試案 2-2. 高さ調整スペーサーを使用した場合

この試案では高さ調整スペーサーを使用した場合を考察する。撮像装置と高さ調整スペーサーは M8 のねじで留める。高さ調整スペーサーと XY 軸ステージは 90mm 四方を M4 のねじで留める。このときの高さは 191mm(撮像装置 + i + ii + ix)と許容範囲に収まる(図 3-12)。高さ調整スペーサーの高さは 175mm~215mm の中間値 191mm になるように 44mm と設定した。

案2-2

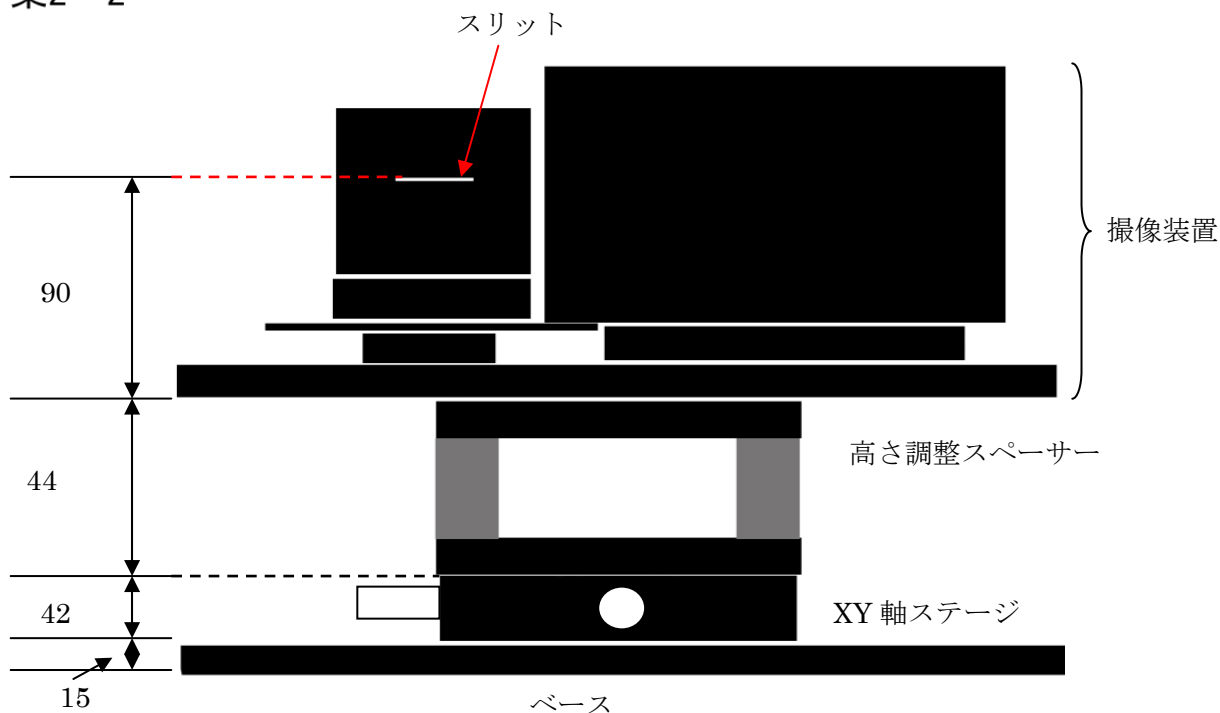


図 3-12. 試案 2-2 の図

・ 試案 2-3. M16P1 M8P1.25 変換スペーサーを使用した場合

この試案では M16P1 M8P1.25 変換スペーサーを使用する。撮像装置と変換スペーサーは変換スペーサーの M8 ねじで留める。変換スペーサー、ロッドスタンド、ロッド、XY 軸ステージはそれぞれ M16 のねじで留めることができる。このときの高さは 208mm(撮像装置 + i + ii + iv + viii)と余裕が 7mm ではあるが許容範囲に収まっている(図 3-13)。

案2-3

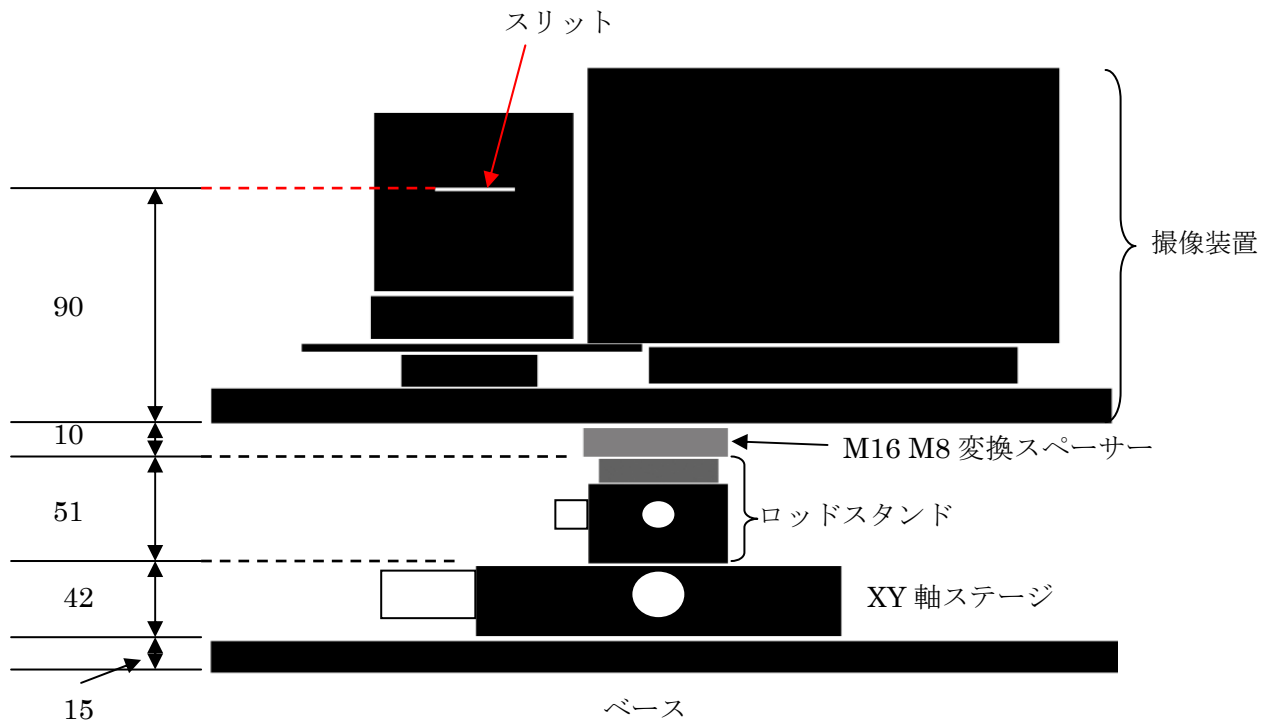


図 3-13. 試案 2-3 の図

・試案 2-4. スペーサー①、②を使用した場合

この試案では小さいスペーサー②を使用した場合を考察する(図 3-14)。撮像装置とスペーサー②は M8 ねじで撮像装置方向から留める(図 3-15)。スペーサー①と②は 50mm 四方を M4 のねじで留める。XY 軸ステージ、ロッドスタンド、ロッド、スペーサー①はそれぞれ M16 のねじで留めることができる。このときの高さは 212mm(撮像装置 + i + ii + iv + v + vi)と許容範囲から余裕が 3mm しかない。

・試案 2-5. スペーサー①、③を使用した場合

このときの組み合わせ方は案 2-4 と同じであるがスペーサー③の構造はスペーサー②と異なり M8 ねじの頭をそのままスペーサー内に収納しようとするものである(図 3-16)。そのため、スペーサー③は②より 3mm 厚く設計する(17mm)。このときの高さは 215mm と許容範囲丁度である(図 3-14)。

案 2-4・5

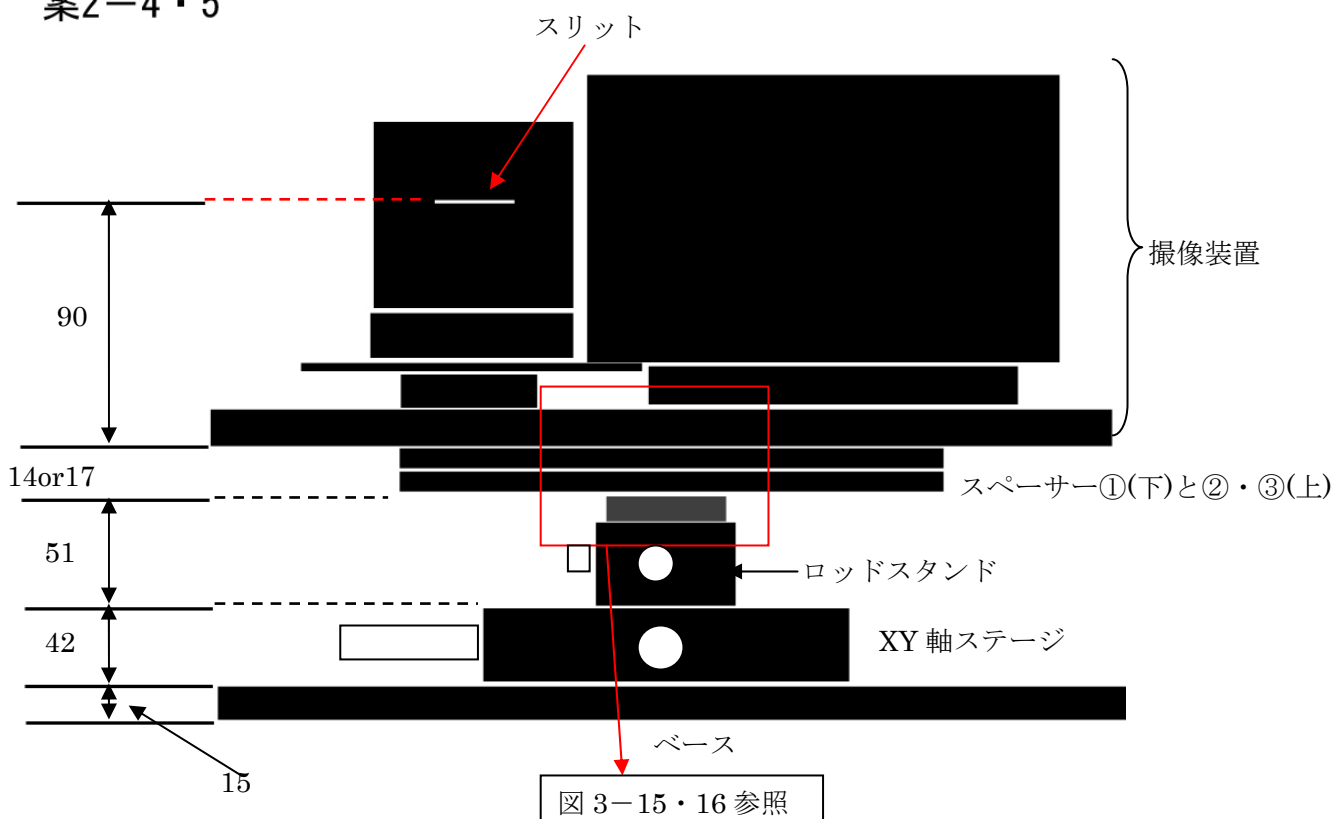


図 3-14. 試案 2-4・5 の図

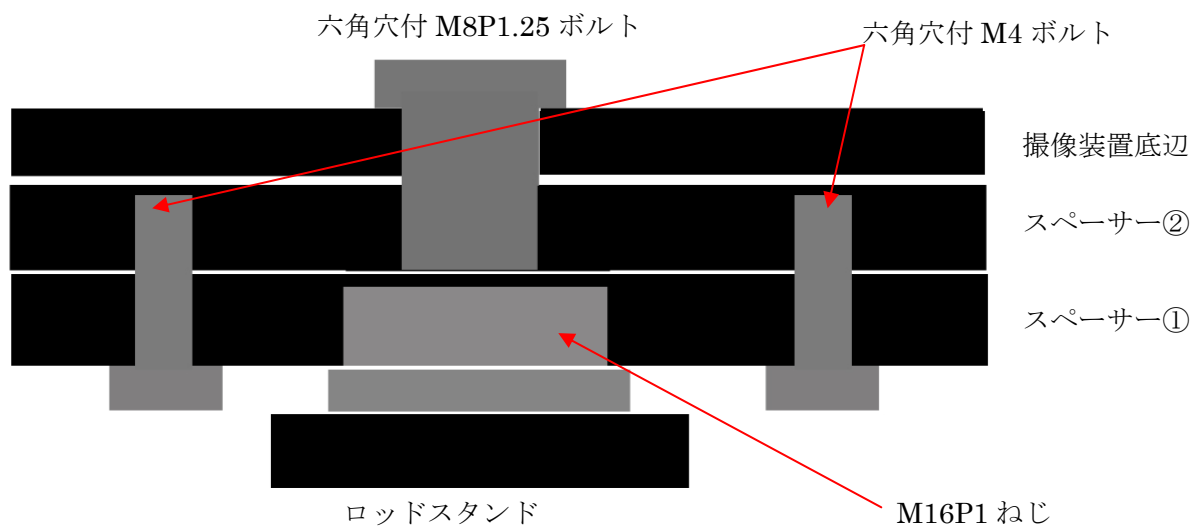


図 3-15. 案 2-4 の接続内部拡大図

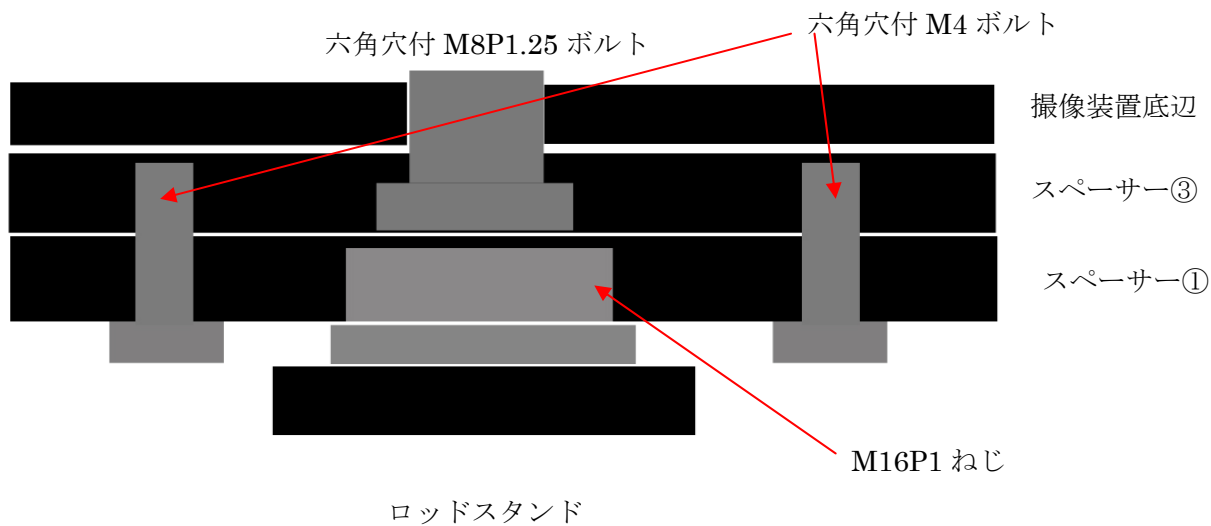


図 3-16. 案 2-5 の接続内部拡大図

六角穴付 M8P1.25 ボルトをスペーサー③内部へ収納する

・結論

安定性と高さ調節の余裕から試案 2-2(高さ調整スペーサーを使用した場合)を採用した。試案 2-2 以外の試案はロッドによる 1 点の支えであったが、高さ調整スペーサーは 4 本の支柱による支えとなるので他の試案よりも安定性が高いこと、また、試案 2-2 以外は許容範囲の 10mm 以内でしか調節できないため高さの微調整が困難であるが、高さ調整スペーサーの場合許容範囲(175~215mm)の中間値(191mm)ということで構築後の微調整を行うことができるという理由からこのような結論に至った。図 3-17 に使用する高さ調整スペーサーの設計を示す。

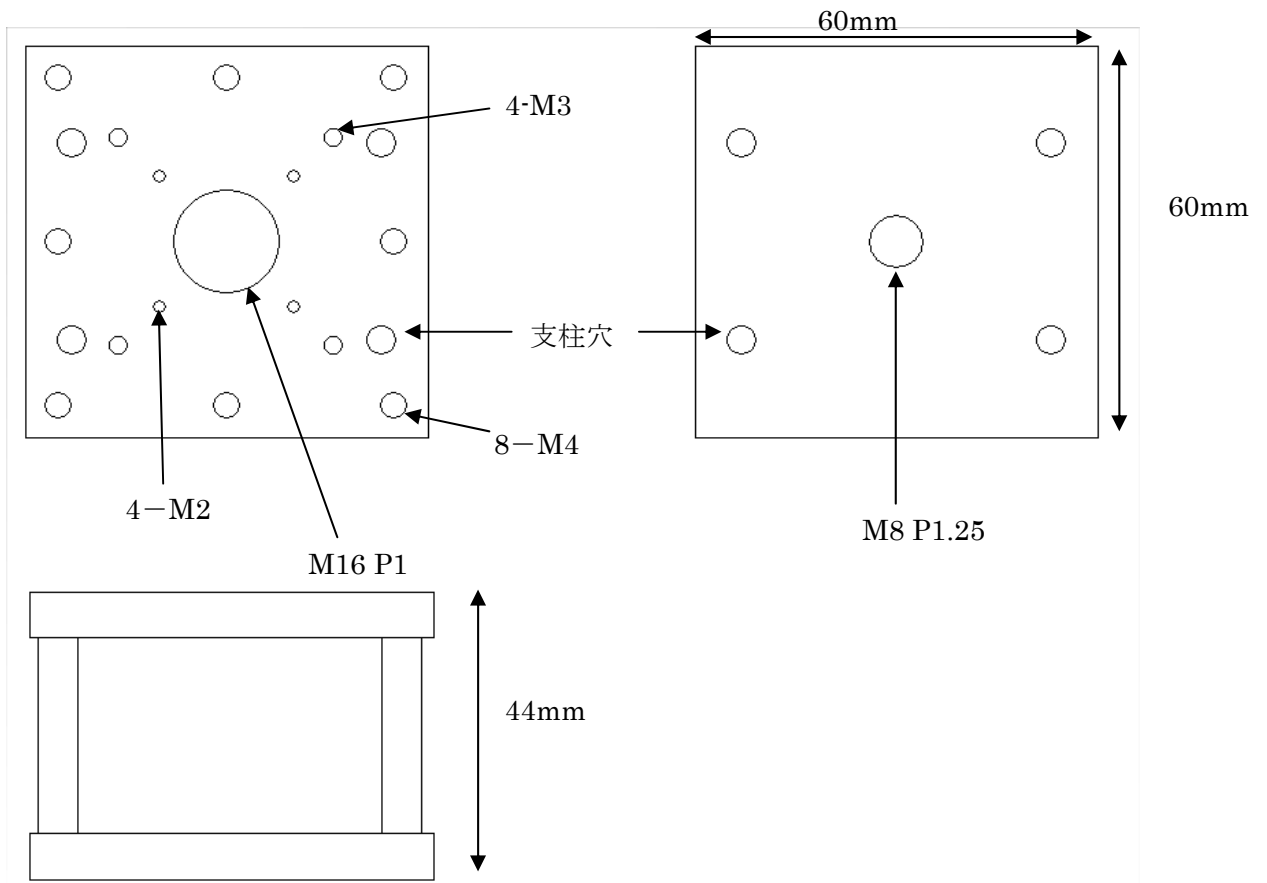


図 3-17. 高さ調整スペーサー設計

3 - 4 - 2. 撮像装置の構築

撮像装置の構築には試案 2-2 を採用し光学台、ベース、XY 軸ステージ、高さ調整スペーサー、撮像装置を使用して行う(図 3-18)。構築を行うにあたり、光学台とベースの固定については、光学台と同じねじ穴を開け四点で固定する場合、穴の位置の正確な測定、ねじ穴を開けるための技術不足から光学台へのベースを両面テープで固定した。

光学台、ベース、XY 軸ステージ、高さ調整スペーサー、撮像装置はそれぞれ両面テープ、M4、M8 ねじで固定される。

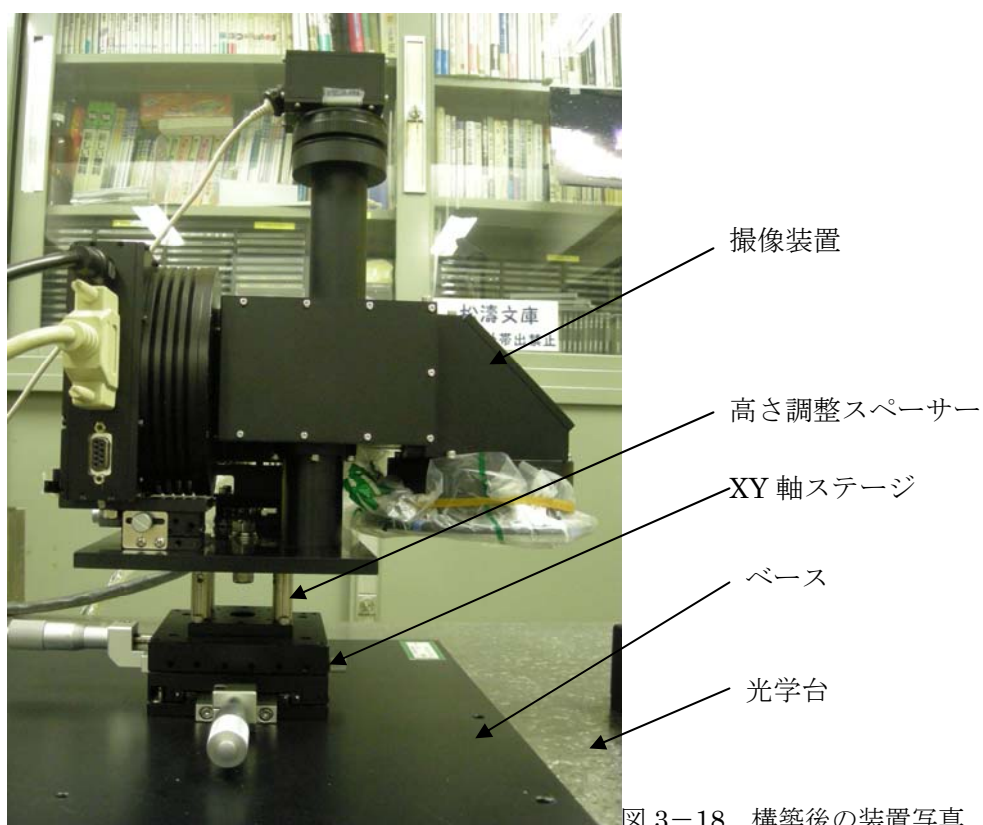


図 3-18. 構築後の装置写真

3-4. VIS、NIR の角度調整

性能評価を行うにあたり、VIS、NIR でスペクトル画像を取得するが、初期の段階でそれぞれのスペクトル画像は X 軸や Y 軸に対して平行ではなく少し斜めの状態であらわれていた(図 3-19)。点光源のスペクトル画像が直線であらわれない原因としては、センサの設置位置関係があげられる。CCD が斜めに設置されていればスペクトル画像も斜めになってしまう。そのため、一度センサをはずし、0.3mm のアルミ板を数枚挿めることで問題の解決を図った(図 3-20)。

VIS については、アルミ板 4 枚を横に 3 枚を縦に挿めることで X 軸に対して平行なスペクトル画像の取得が可能になった。NIR については、以前挿めてあったアルミ板をすべて外したところ Y 軸に対して平行なスペクトル画像を取得することが可能となった。

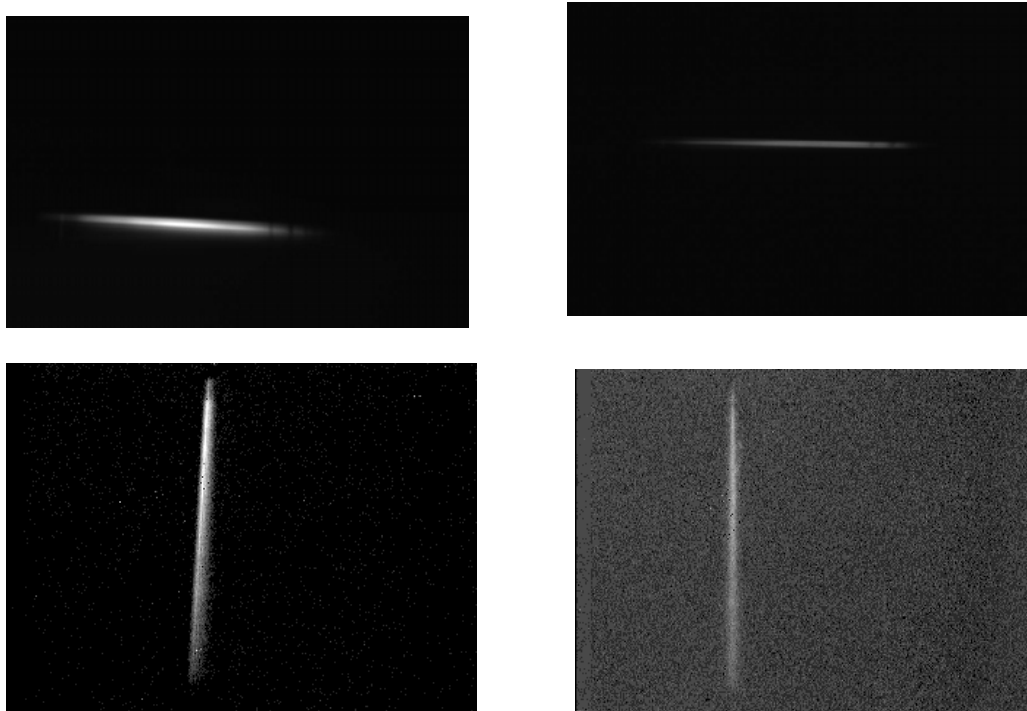


図 3-19. VIS の位置調整前(左上)と調整後(右上)

NIR の位置調整前(左下)と調整後(右下)

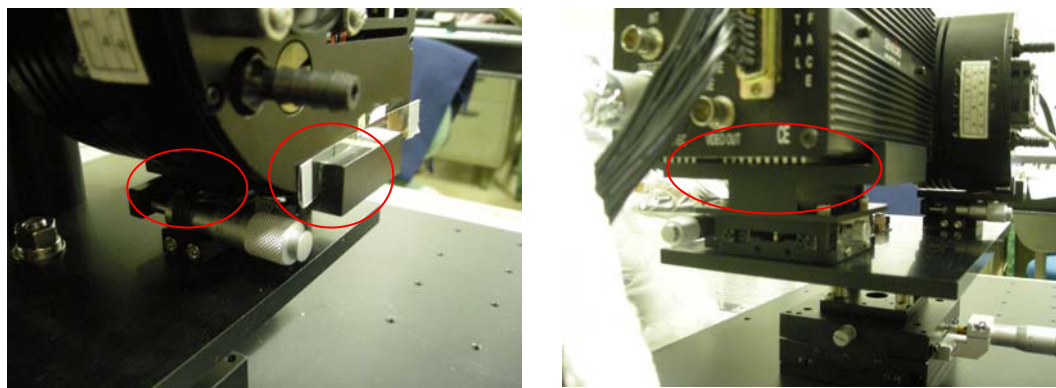


図 3-20. VIS のアルミ板(左)と NIR のアルミ板が挿んであった場所(右)

4. 連続分光撮像装置の性能評価

4-1. VIS、NIR の焦点位置調整

性能評価のはじめとして、VIS、NIR の焦点位置調整を行っていく。焦点位置調整は月面撮像時での調整が困難なため実験室内において 3 章で構築した光学装置を使用して行う。焦点が合わないと輝線、吸収帯を確認することができないため、焦点位置を調整することは月面連続分光画像を取得する上で重要なものである。

VIS、NIR それぞれの焦点位置は最大輝度値を示す場所が一番集光していると考え、VIS、NIR とともに 4 か所の列・行における最大輝度値を調査していく。この操作をスリットの右端、中心、左端と点光源を動かしてそれぞれに対して行う。そのなかでさらに一番輝度値の高い位置を焦点位置とした。輝度値の調査にはリモートセンシングデータ用解析ソフト「ENVI」を使用して行う。

4-1-1. VIS の焦点位置調整

VIS の焦点位置調整は VIS の台に設置している微調節ねじによって 3~10 目盛り(1 目盛り 1mm)の範囲を 0.5 目盛りずつずらしながら撮像を行い、200、300、400、500 列目における最大輝度値を調査していく。VIS はスペクトル画像が行方向に表れるため(図 3-19 参照)上記の列について調査を行った。結果を図 4-1 および表 4-1 に示す。

図表の結果から、VIS は 9 目盛り目の最大輝度値が一番高かったので焦点位置は 9 目盛り目と決定した。

4-1-2. NIR の焦点位置調整

NIR の焦点位置調整は VIS 同様に NIR の微調節ねじによって 6.5~11 目盛りの範囲で 0.5mm ずつずらしながら撮像を行い、50、100、150、200 行目における最大輝度値を調査していく。NIR はスペクトル画像が列方向に表れるため(図 3-19)参照上記の行について調査を行った。結果を図 4-2 および表 4-2 に示す。

図表の結果から、NIR は 10.5 目盛り目の最大輝度値が一番高かったので焦点位置は 10.5 目盛り目と決定した。

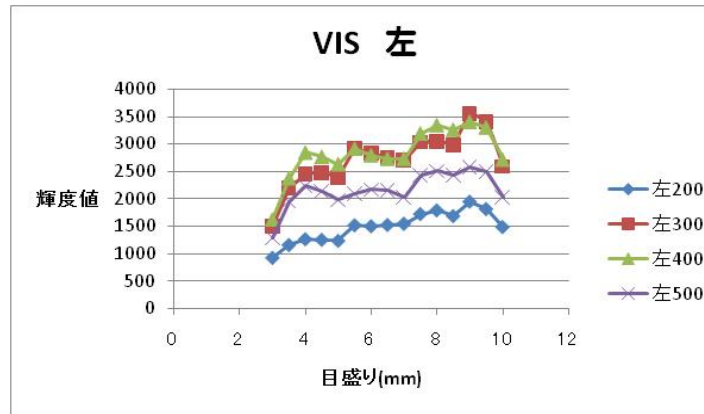
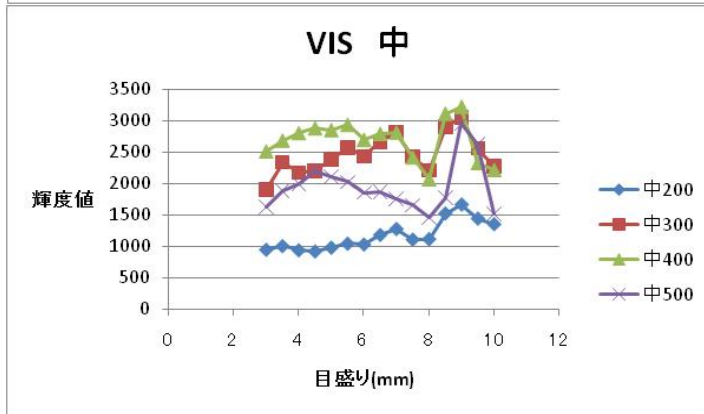
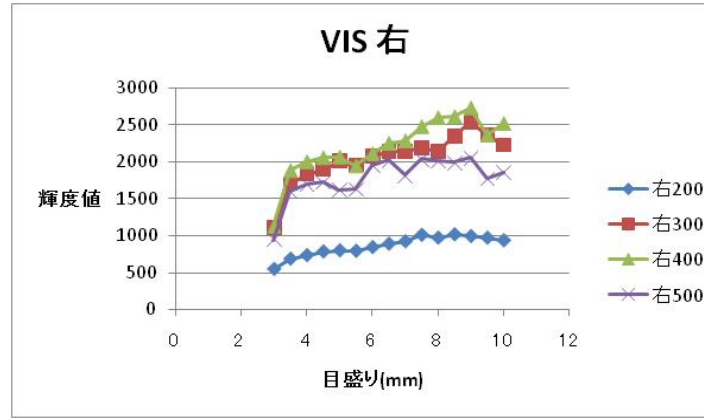
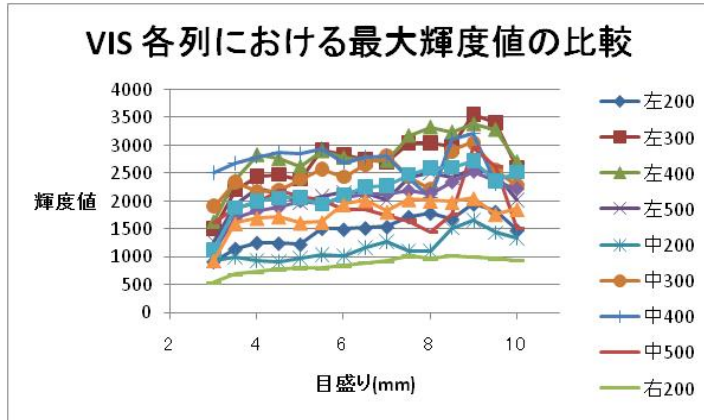


図 4-2 各行における最大輝度値の比較

pixel番号	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
左200	917	1153	1260	1248	1230	1516	1499	1522	1544	1724	1790	1685	1951	1816	1484
左300	1499	2198	2451	2480	2388	2918	2833	2751	2708	3041	3050	2980	3562	3405	2596
左400	1631	2375	2841	2764	2629	2910	2790	2730	2730	3184	3335	3251	3396	3295	2714
左500	1278	1943	2223	2127	1968	2089	2159	2149	2019	2414	2498	2428	2572	2487	2023
中200	942	1000	934	915	975	1039	1026	1179	1274	1105	1111	1522	1664	1440	1350
中300	1906	2342	2177	2202	2393	2580	2437	2663	2822	2435	2212	2906	3058	2564	2284
中400	2509	2682	2801	2878	2850	2933	2694	2789	2811	2413	2064	3111	3220	2328	2215
中500	1622	1881	1989	2195	2099	2023	1851	1864	1748	1649	1451	1768	2963	2627	1515
右200	545	685	733	784	800	793	844	890	922	1011	972	1017	994	972	937
右300	1103	1699	1833	1891	2007	1956	2069	2138	2137	2190	2140	2345	2537	2361	2223
右400	1124	1882	2002	2057	2064	1944	2108	2252	2283	2477	2598	2610	2728	2362	2519
右500	942	1608	1704	1727	1618	1628	1947	2020	1816	2037	2012	1988	2058	1772	1860

表 4-1. 各列における各目盛りの最大輝度値

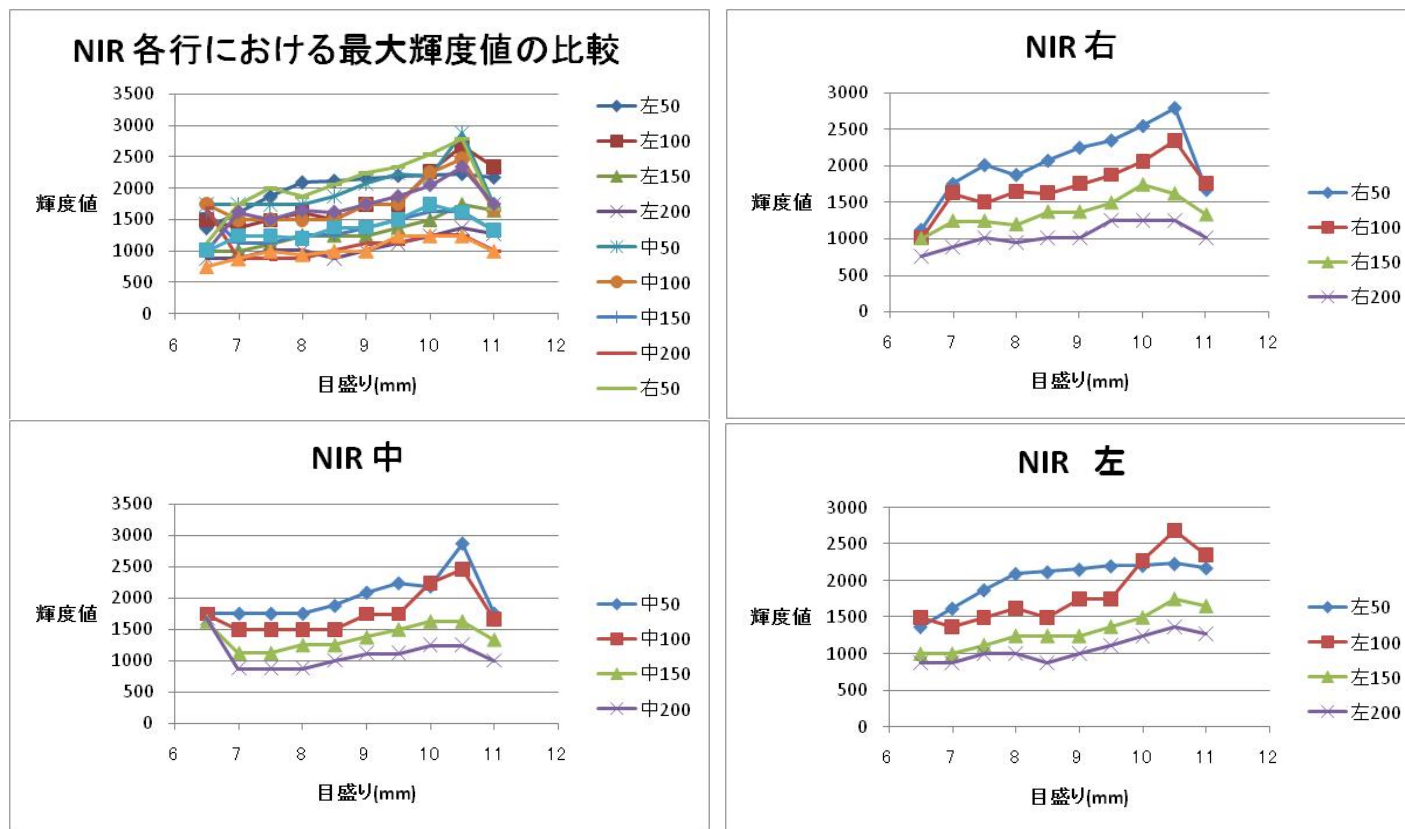


図 4-2
各行における最大輝度値の比較

pixel番号	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11
左50	1373	1624	1875	2098	2121	2156	2203	2209	2234	2176
左100	1498	1373	1498	1624	1498	1749	1749	2267	2682	2345
左150	1004	1004	1122	1247	1247	1247	1373	1498	1749	1654
左200	878	878	1004	1004	878	1004	1122	1247	1373	1273
中50	1749	1749	1749	1749	1875	2087	2238	2186	2876	1749
中100	1749	1498	1498	1498	1498	1749	1749	2234	2465	1671
中150	1624	1122	1122	1247	1247	1373	1498	1624	1624	1333
中200	1678	878	878	878	1004	1122	1122	1247	1247	1004
右50	1122	1749	2009	1875	2067	2246	2345	2543	2789	1671
右100	1004	1624	1498	1647	1624	1749	1875	2054	2345	1749
右150	1004	1247	1247	1200	1373	1373	1498	1749	1624	1333
右200	753	878	1004	949	1004	1004	1247	1247	1247	1004

表 4-1. 各行における各目盛りの最大輝度値

4-2. VIS、NIR の波長対応調査

3 章で VIS、NIR の角度調整を行い、今後の分析が行いやすいようにそれぞれのスペクトル画像を行・列に対して平行にした。しかし、スリットの左から右へ点光源を移動させたときの連続画像(図 4-3)を確認すると、平行から数 pixel ずれていることがわかった。そこで、スペクトル画像が傾いていても行と列の pixel 数でそのポイントの波長を確認できる関数を導入することにした。この関数を導入することによって、画面上の特定のポイントにおける波長を知ることができる。

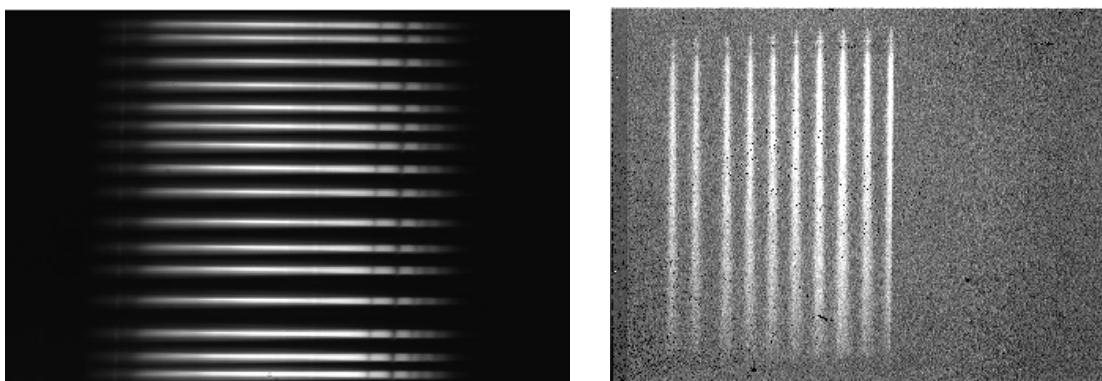


図 4-3. VIS(左)、NIR(右)の連続画像

VIS については間隔が不均一であるが、NIR については XY ステージに付いている微調整ねじにより 0.3mm 間隔で撮像した。スリットの間隔が 3mm であったので 10 か所撮像するため 0.3mm 間隔となった。

4-2-1. スペクトル画像の中心調査

スペクトル画像の輝度値を測定するために幅のあるスペクトル画像のどの pixel 数を中心とするかということで、VIS については 200、350、500 列目における各行の輝度値分布を、NIR については 50、100、150、200 行における各列の輝度値分布を測定した。つまり、スペクトル画像にある程度幅があってもその中での最大輝度値を中心と見ればよいのである。測定結果を次頁に示す。

200列目	350列目	500列目	平均
21	20.0	22	21
39	38.0	40	39
71	70.0	72	71
103	102.0	104	103
133	132.0	133	132
158	157.5	159	158
184	183.0	185	184
215	214.5	215	215
247	246.0	248	247
288	287.0	289	288
323	321.5	324	323
351	351.5	352	352
394	392.5	395	394
439	438.0	439	439
471	469.5	471	471
494	492.5	493	493

表 4-3

VIS の各列における最大輝度値を示す行とその平均

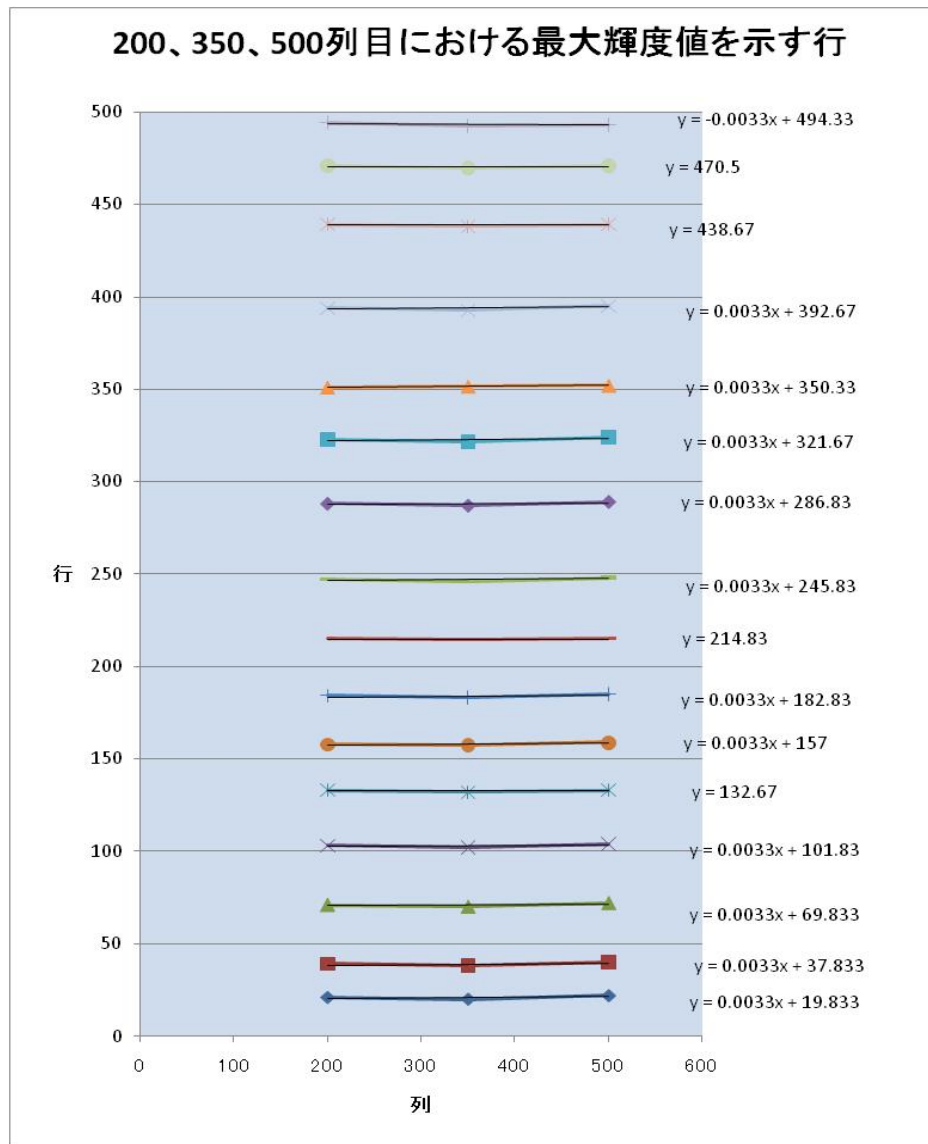


図 4-4

VIS の各列における最大輝度値を示す行とその近似式

50行目	100行目	150行目	200行目	平均
41	40	40	40	40
55	55	55	54	55
75	75	74	74	75
90	89	89	89	89
104	104	104	104	104
120	119	119	119	119
134	133	133	133	133
148	148	147	147	148
164	164	164	163	164
178	178	178	178	178

表 4-4

NIR の各行における最大輝度値を示す列とその平均

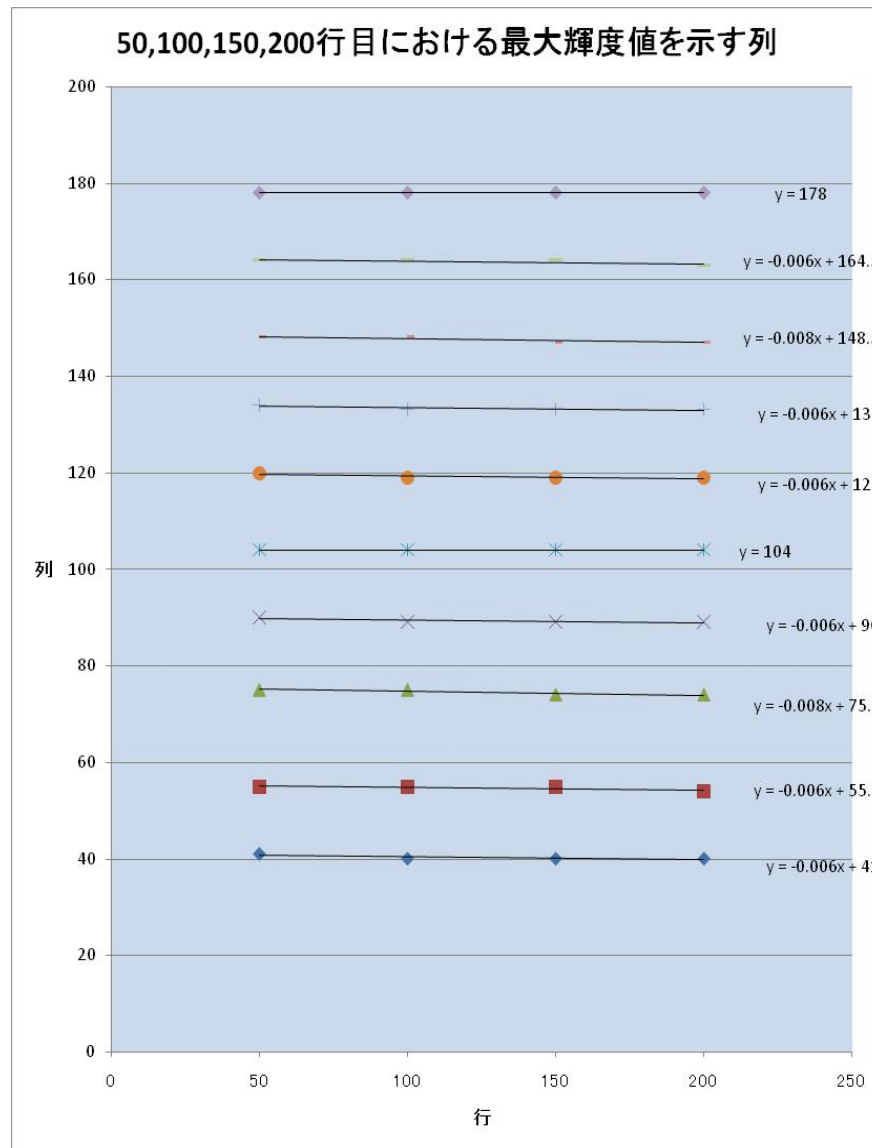


図 4-5

NIR の各行における最大輝度値を示す列とその近似式

4-2-2. 各スペクトル画像の傾き

前項で各スペクトル画像の中心を測定し、その平均を今後中心として使用して行くことにした。しかし、スペクトル画像が歪んでいることが図 4-4・5 から確認できる。直線であれば各行・列における最大輝度値は同じ値になるはずであるが、VIS、NIR 共に値が一律ではない。スペクトル画像を直線とみなすことができなければ画像解析を行う上で非常に不便である。そこで各スペクトル画像を直線と見なすための制約を定めることとした。この制約を定めるにあたって VIS、NIR の有効波長範囲を確認したところ[齋藤 2005]より VIS は 550nm~1100nm、NIR は 1000nm~1700nm と定められている。この波長範囲内でスペクトル画像がどの程度の差があるのかを確認する。そのためには、各波長と行・列の対応を調べなければならない。波長対応調査では VIS、NIR のスペクトルの輝度値分布グラフ、Hg の輝線分布図、750、950、1053、1245.5、1540nm の filter を使用する。VIS、NIR のスペクトルの輝度値分布グラフは各スペクトルが直線であると仮定した上で使用する。Hg の輝線分布表は今回使用している光源が Hg ランプであるため使用した。各波長の filter は指定された波長の光のみ透過するので波長対応を見る上で必要である。

最初に filter を使用した撮影を行う。VIS については 750、950、1053nm と対応する列を、NIR については 1050、1245.5、1540nm と対応する行をそれぞれ調査した(図 4-6・7 および表 4-5・6)。次に VIS、NIR のスペクトルの輝度値分布グラフと Hg の輝度値分布表を使用して特徴的な輝線の対応を確認していく(図 4-8~10 および表 4-7・8)。この結果を利用して、VIS と NIR の有効波長範囲である 550・1100nm、1000・1700nm にそれぞれ対応する列・行を導き出す(表 4-9・10)。これらの値を図 4-4・5 で示しているグラフの各近似式へ代入し、有効波長範囲内でどのくらいの差があるのかを確認する(表 4-11・12)。

以上の結果から有効波長範囲内では約 1~2pixel の差があること確認できた。つまり、これらのスペクトル画像は 2pixel の空間誤差があるため、この空間誤差と比較して十分広い範囲の空間解像度(~10pixel)を持つと考えることができる。

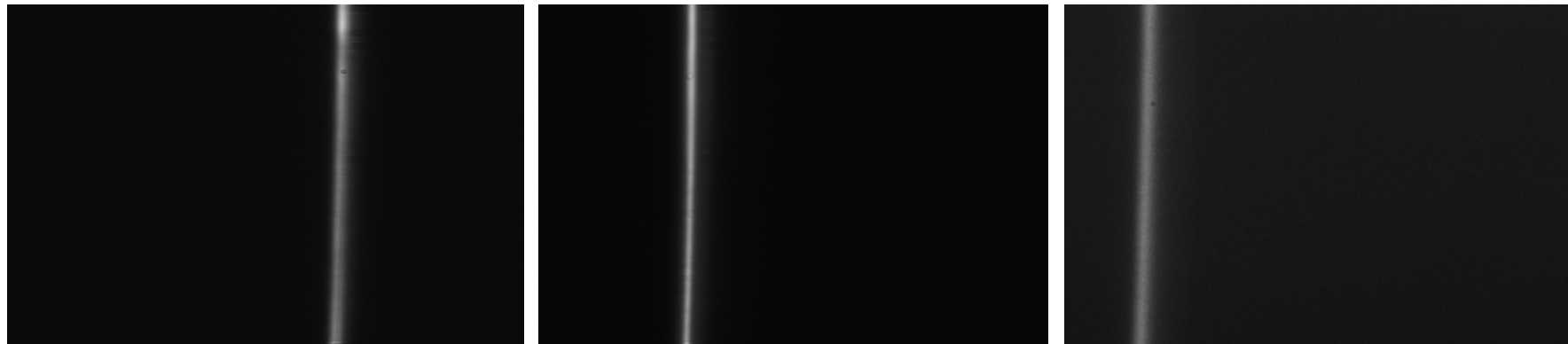


図 4-6
750(左)、950(中)、1053nm(右)の filter 使用時の VIS 画像

波長(λ)	21行目	39行目	71行目	103行目	133行目	158行目	184行目	215行目	247行目	288行目	323行目	352行目	394行目	439行目	471行目	493行目
750	499	498	498	496	496	496	496	495	495	494	492	492	490	490	489	489
950	247	246	245	245	244	244	243	242	242	241	240	240	239	238	236	235
1053	116	116	115	113	112	111	110	108	108	107	107	106	105	106	104	103

表 4-5. 各行における 750、950、1053nm と列の対応表

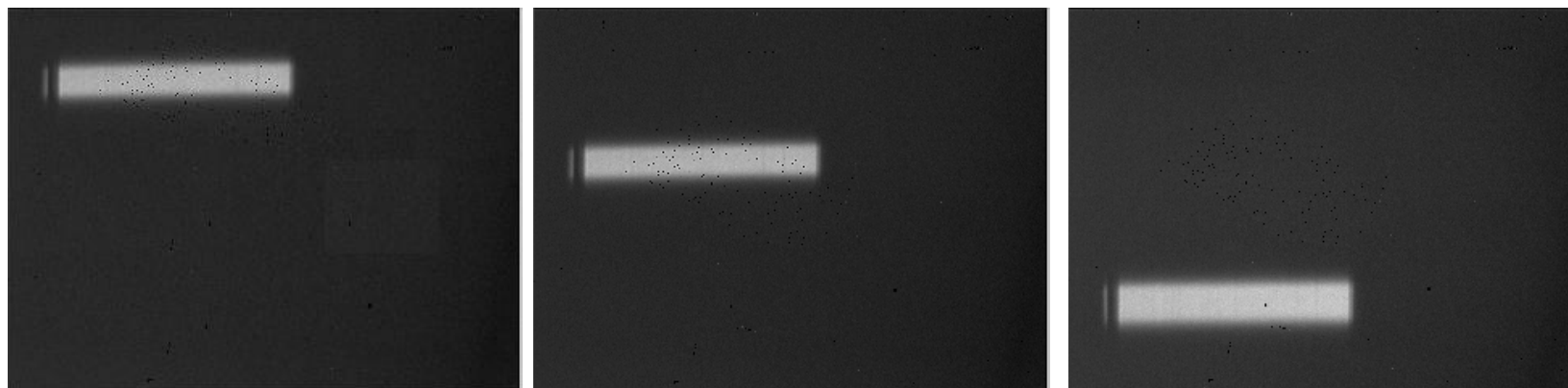


図 4-7
1053(左)、1245.5(中)、1540nm(右)の filter 使用時の NIR 画像

波長(λ)	40列目	55列目	75列目	89列目	104列目	118列目	134列目	148列目	164列目	178列目
1014	27	27	27	26	26	26	25	25	24	24
1245.5	96	95	95	94	94	94	93	93	93	92
1540	183	183	182	182	181	181	181	180	180	180

表 4-6. 各列における 1053、1245.5、1540nm と行の対応表



図 4-8. VIS の行における輝度値分布図(例：288 行目)

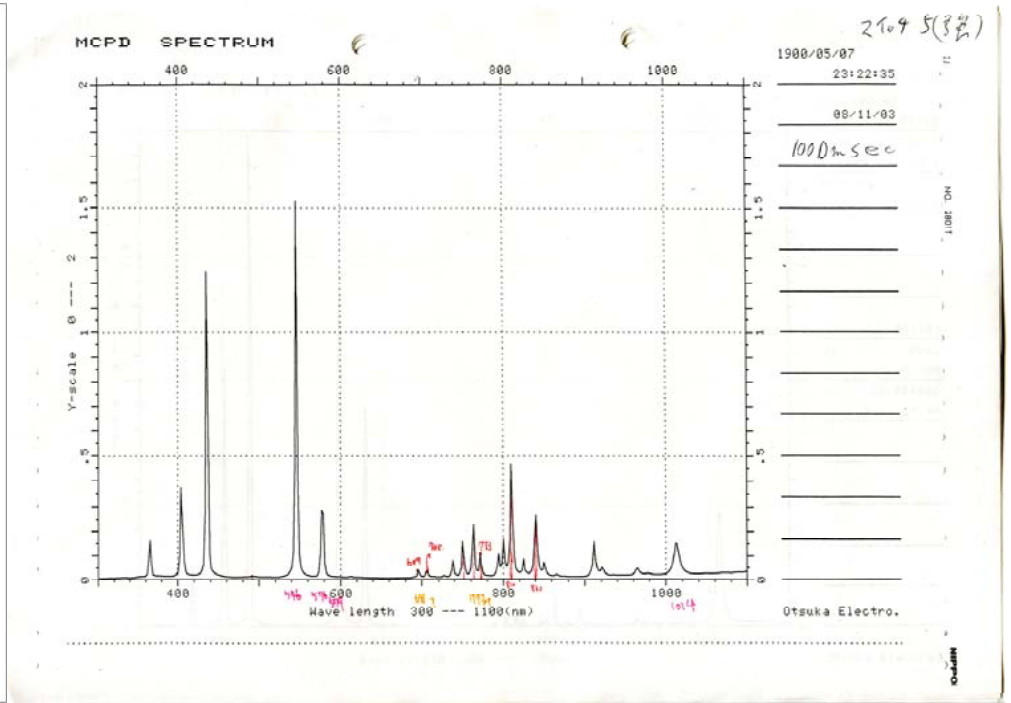


図 4-9. Hg の輝線分布表

波長(λ)	21行目	39行目	71行目	103行目	133行目	158行目	184行目	215行目	247行目	288行目	323行目	352行目	394行目	439行目	471行目	493行目
1014	164	163	162	161	160	160	159	159	158	157	156	155	154	153	152	151
854	370	368	367	367	365	364	363		363	361						356
840	387	387	386	386	385	384	382		380	380	379					
810	428	427	427	424	423	424	424	423	423	421	422	419	417			
735	523	523	521	520	519	518	517	516	516	515	515	514	513	512	511	510
708	555	554	554	553	552	551	549	549	548	547	547	546	544	543	542	541
750	499	498	498	496	496	496	496	495	495	494	492	492	490	490	489	489
950	247	246	245	245	244	244	243	242	242	241	240	240	239	238	236	235
1053	116	116	115	113	112	111	110	108	108	107	107	106	105	106	104	103

表 4-7. VIS の各行における波長と列の対応表

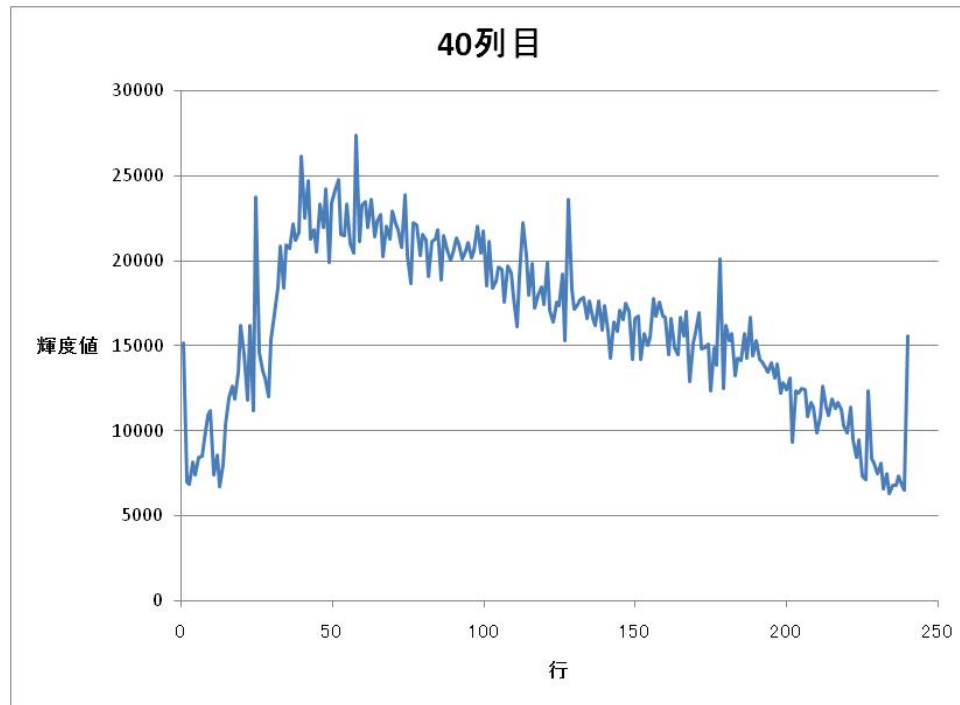


図 4-8. NIR の列における輝度値分布図(例 : 40 列目)

波長(λ)	40列目	55列目	75列目	89列目	104列目	118列目	134列目	148列目	164列目	178列目
1014	27	27	27	26	26	26	25	25	24	24
1053	39	39	39	38	38	37	37	37	36	36
1129	61	61	61	60	60	59	59	59	58	58
1245.5	96	95	95	94	94	94	93	93	93	92
1367	131	131	131	130	130	129	129	128	128	128
1530	180	180	179	179	179	178	178	178	177	177
1540	183	183	182	182	181	181	181	180	180	180
1692	227	227	227	226	226	226	225	225	224	224

表 4-8. NIR における各列の波長と行の対応表

波長(λ)	21行目	39行目	71行目	103行目	133行目	158行目	184行目	215行目	247行目	288行目	323行目	352行目	394行目	439行目	471行目	493行目
550	757.31	756.38	756.10	754.82	754.02	753.35	752.46	752.27	751.79	750.58	750.32	749.30	747.10	745.39	744.71	744.13
1100	55.51	54.85	53.76	52.84	51.60	51.19	50.30	49.21	48.82	47.79	47.17	46.51	45.66	45.55	43.72	42.60

表 4-9. VIS の有効波長範囲 550~1100nm と列の対応

波長(λ)	40列目	55列目	75列目	89列目	104列目	118列目	134列目	148列目	164列目	178列目
1000	23.12	22.93	22.99	21.93	21.97	21.31	20.93	20.87	20.12	19.93
1700	229.85	229.79	229.12	228.79	228.46	228.11	227.76	227.30	226.85	226.79

表 4-10. NIR の有効波長範囲 1000~1700nm と行の対応

波長(λ)	21行目	39行目	71行目	103行目	133行目	158行目	184行目	215行目	247行目	288行目	323行目	352行目	394行目	439行目	471行目	493行目
550	22.33	40.33	72.33	104.32	132.67	159.49	185.31	214.83	248.31	289.31	324.15	352.80	395.14	438.67	470.50	491.87
1100	20.02	38.01	70.01	102.00	132.67	157.17	183.00	214.83	245.99	286.99	321.83	350.48	392.82	438.67	470.50	494.19
差	2.32	2.32	2.32	2.32	0.00	2.32	2.32	0.00	2.32	2.32	2.32	2.32	2.31	0.00	0.00	2.32

(差の平均)=1.74pixel

表 4-11. VIS の有効波長範囲内の差とその平均

波長(λ)	40列目	55列目	75列目	89列目	104列目	118列目	134列目	148列目	164列目	178列目
1000	40.86	55.36	75.32	89.87	104.00	119.87	133.87	148.33	164.38	178.00
1700	39.62	54.12	73.67	88.63	104.00	118.63	132.63	146.68	163.14	178.00
差	1.24	1.24	1.65	1.24	0.00	1.24	1.24	1.65	1.24	0.00

(差の平均)=1.07pixel

表 4-12. NIR の有効波長範囲内の差とその平均

4-2-3. 波長と行・列の関数

VIS の関数の導入

VIS についての波長と行・列の関数を導入する際、各行における波長と列の対応グラフの近似式(図 4-9)を基本に波長(λ)を行・列の 1 次式で導入する。波長と列対応グラフの近似式の傾きの平均をとると $a=-0.7834$ となる(表 4-13)。切片については、各行と切片の関係をグラフにしその近似式を基本の式に代入すると $b=-0.0196$ 、 $c=1143.3$ となる(図 4-10)。つまり、VIS の波長と行・列の関数は

$$(\lambda) = -0.7834X - 0.020Y + 1143.3 \quad (4-1)$$

となる。

NIR の関数の導入

NIR の関数を導入する際も VIS と同様の方法を行う。NIR の場合、各列における波長と行の対応グラフの近似式(図 4-11)を基本に波長(λ)を行・列の 1 次式で導入する。VIS 同様に各グラフの傾きの平均をとると $a=3.526$ となる(表 4-14)。切片については各列と切片の関係をグラフにしその近似式を代入すると $b=0.08$ 、 $c=904.95$ となる(図 4-12)。つまり NIR の波長と行・列の関数は

$$(\lambda) = 3.387Y + 0.084X + 917.5 \quad (4-2)$$

となる。

VIS、NIR それぞれの関数をもとに計算上の対応値を導き出し(表 4-15・17)、実際の測定値との差(表 4-16・18)の標準偏差は VIS は 1.019nm、NIR は 1.39nm であった。この結果から波長は 2nm の誤差を含むといえる。

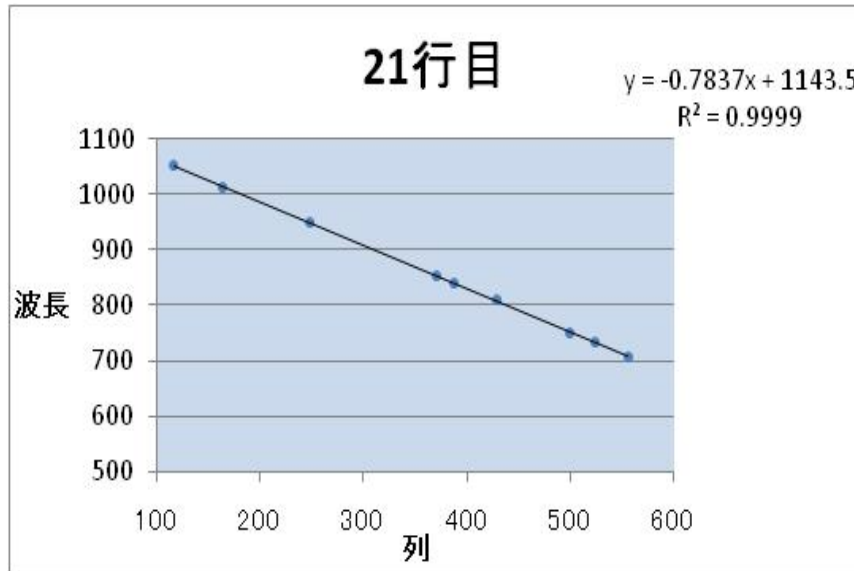


図 4-9. VIS の行における波長と列の対応(例：21 行目)

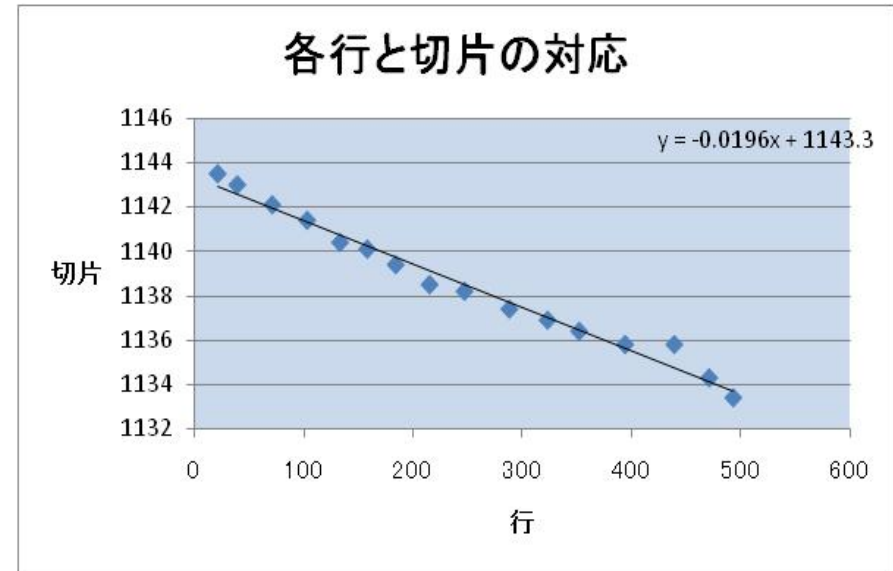


図 4-10. VIS の各行と切片の対応

	21行目	39行目	71行目	103行目	133行目	158行目	184行目	215行目	247行目	288行目	323行目	352行目	394行目	439行目	471行目	493行目
傾き	-0.7837	-0.784	-0.7831	-0.7835	-0.783	-0.783	-0.783	-0.782	-0.782	-0.783	-0.782	-0.783	-0.784	-0.786	-0.7846	-0.784

(傾きの平均)=-0.7834

表 4-13. 各行における傾きとその平均

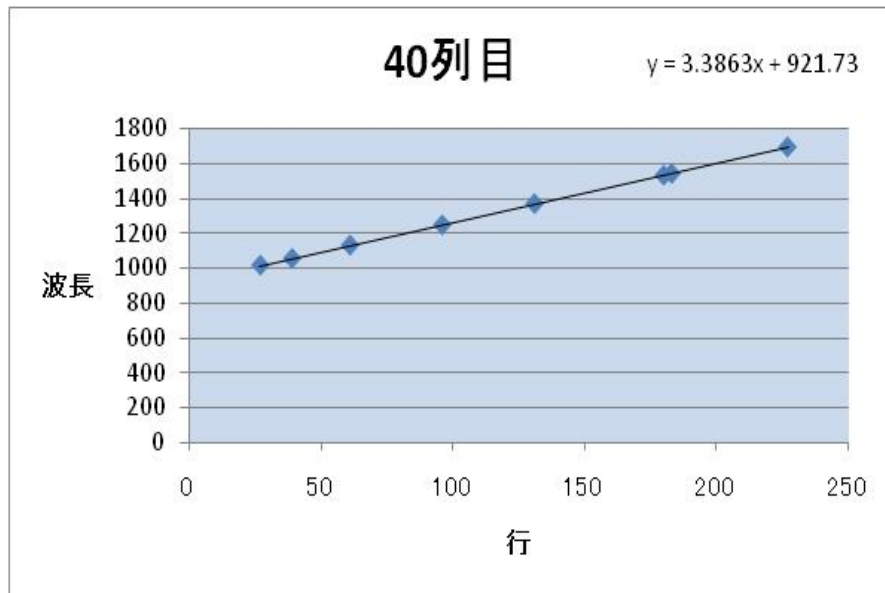


図 4-11. NIR の列における波長と行の対応(例：40 列目)

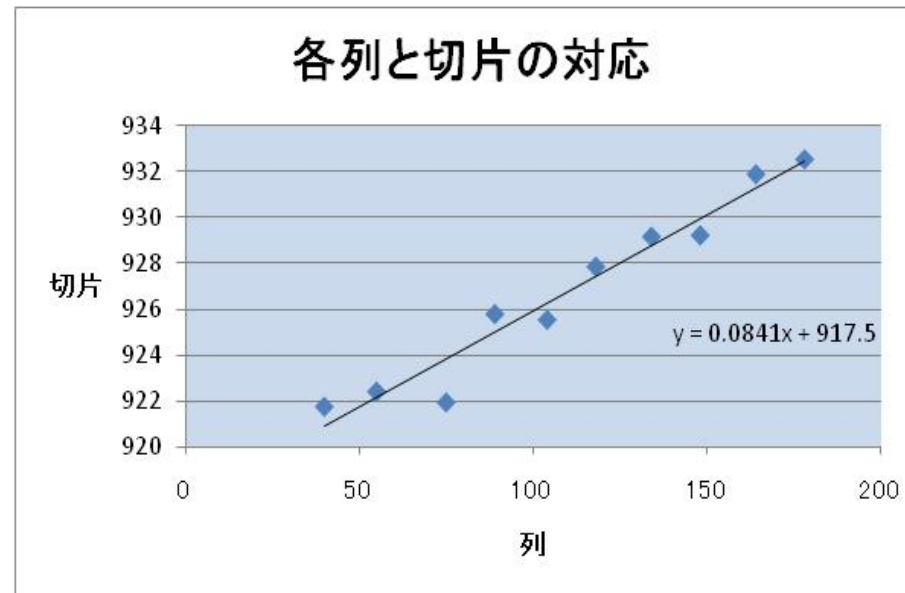


図 4-12. NIR の各列と切片の対応

	40列目	55列目	75列目	89列目	104列目	118列目	134列目	148列目	164列目	178列目
傾き	3.386	3.384	3.396	3.384	3.39	3.385	3.3845	3.391	3.386	3.384

(傾きの平均)=3.387

表 4-14. 各列における傾きとその平均

波長(λ)	21行目	39行目	71行目	103行目	133行目	158行目	184行目	215行目	247行目	288行目	323行目	352行目	394行目	439行目	471行目	493行目
1014	1014.41	1014.84	1015.00	1015.15	1015.35	1014.86	1015.13	1014.53	1014.68	1014.66	1014.76	1014.97	1014.93	1014.84	1014.99	1015.34
854	853.03	854.24	854.40	853.77	854.75	855.05	855.32		854.08	854.85						854.75
840	839.71	839.36	839.52	838.89	839.08	839.38	840.43		840.77	839.96	840.06					
810	809.94	810.37	809.75	811.47	811.67	810.39	809.88	810.06	809.43	810.19	808.72	810.51	811.25			
735	733.17	732.82	733.76	733.91	734.11	734.40	734.68	734.85	734.22	734.20	733.52	733.73	733.69	733.59	733.75	734.10
708	708.10	708.53	707.90	708.06	708.26	708.55	709.61	709.00	709.16	709.14	708.45	708.66	709.41	709.31	709.47	709.82
750	751.97	752.40	751.78	752.71	752.13	751.64	751.13	751.30	750.68	750.66	751.54	750.97	751.71	750.83	750.99	750.55
950	949.39	949.82	949.98	949.35	949.54	949.05	949.33	949.50	948.88	948.86	948.95	948.38	948.35	948.25	949.19	949.54
1053	1052.01	1051.66	1051.82	1052.76	1052.95	1053.25	1053.52	1054.48	1053.85	1053.83	1053.15	1053.36	1053.32	1051.66	1052.59	1052.95

表 4-15. VIS の計算上の対応値

波長(λ)	21行目	39行目	71行目	103行目	133行目	158行目	184行目	215行目	247行目	288行目	323行目	352行目	394行目	439行目	471行目	493行目
1014	0.41	0.84	1.00	1.15	1.35	0.86	1.13	0.53	0.68	0.66	0.76	0.97	0.93	0.84	0.99	1.34
854	-0.97	0.24	0.40	-0.23	0.75	1.05	1.32		0.08	0.85						0.75
840	-0.29	-0.64	-0.48	-1.11	-0.92	-0.62	0.43		0.77	-0.04	0.06					
810	-0.06	0.37	-0.25	1.47	1.67	0.39	-0.12	0.06	-0.57	0.19	-1.28	0.51	1.25			
735	-1.83	-2.18	-1.24	-1.09	-0.89	-0.60	-0.32	-0.15	-0.78	-0.80	-1.48	-1.27	-1.31	-1.41	-1.25	-0.90
708	0.10	0.53	-0.10	0.06	0.26	0.55	1.61	1.00	1.16	1.14	0.45	0.66	1.41	1.31	1.47	1.82
750	1.97	2.40	1.78	2.71	2.13	1.64	1.13	1.30	0.68	0.66	1.54	0.97	1.71	0.83	0.99	0.55
950	-0.61	-0.18	-0.02	-0.65	-0.46	-0.95	-0.67	-0.50	-1.12	-1.14	-1.05	-1.62	-1.66	-1.75	-0.81	-0.46
1053	-0.99	-1.34	-1.18	-0.24	-0.05	0.25	0.52	1.48	0.85	0.83	0.15	0.36	0.32	-1.34	-0.41	-0.05

標準偏差 1.019nm

表 4-16. VIS の実際の測定値と計算上の対応値の差と標準偏差

波長	40列目	55列目	75列目	89列目	104列目	118列目	134列目	148列目	164列目	178列目
1014	1012.31	1013.57	1015.25	1013.04	1014.30	1015.47	1013.43	1014.61	1012.56	1013.74
1053	1052.95	1054.21	1055.89	1053.68	1054.94	1052.73	1054.08	1055.25	1053.21	1054.38
1129	1127.47	1128.73	1130.41	1128.20	1129.46	1127.25	1128.59	1129.77	1127.72	1128.90
1245.5	1246.01	1243.89	1245.57	1243.35	1244.61	1245.79	1243.75	1244.92	1246.27	1244.06
1367	1364.56	1365.82	1367.50	1365.29	1366.55	1364.34	1365.68	1363.47	1364.81	1365.99
1530	1530.52	1531.78	1530.07	1531.25	1532.51	1530.30	1531.64	1532.82	1530.78	1531.95
1540	1540.68	1541.94	1540.23	1541.41	1539.28	1540.46	1541.80	1539.59	1540.94	1542.11
1692	1689.71	1690.97	1692.65	1690.44	1691.70	1692.87	1690.83	1692.01	1689.96	1691.14

表 4-17. NIR の計算上の対応値

波長	40列目	55列目	75列目	89列目	104列目	118列目	134列目	148列目	164列目	178列目
1014	-1.69	-0.43	1.25	-0.96	0.30	1.47	-0.57	0.61	-1.44	-0.26
1053	-0.05	1.21	2.89	0.68	1.94	-0.27	1.08	2.25	0.21	1.38
1129	-1.53	-0.27	1.41	-0.80	0.46	-1.76	-0.41	0.76	-1.28	-0.10
1245.5	0.51	-1.62	0.07	-2.15	-0.89	0.29	-1.75	-0.58	0.77	-1.44
1367	-2.44	-1.18	0.50	-1.71	-0.45	-2.66	-1.32	-3.53	-2.19	-1.01
1530	0.52	1.78	0.07	1.25	2.51	0.30	1.64	2.82	0.78	1.95
1540	0.68	1.94	0.23	1.41	-0.72	0.46	1.80	-0.41	0.94	2.11
1692	-2.29	-1.03	0.65	-1.56	-0.30	0.87	-1.17	0.01	-2.04	-0.86

標準偏差 1.389nm

表 4-18. NIR の実際の測定値と計算上の対応値の差と標準偏差

VIS の最小二乗法を利用した関数の導入

VIS の基本的な式は λ (波長) = aX (列) + bY (行) + $1c$ である。このときの VIS のデータ数は 129 個である。よって規準方程式は式(4-3)のようになる。また、VIS における波長、行、列の対応は測定済み(表 4-5)であるため式(4-3)は式(4-4)のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \sum X^2 a + \sum XYb + \sum Xc &= \sum X\lambda \\ \sum XYa + \sum Y^2 b + \sum Yc &= \sum Y\lambda \\ \sum Xa + \sum Yb + 129c &= \sum \lambda \end{aligned} \right\} \quad (4-5)$$

∴ それぞれに対応した値を代入すれば係数 a, b, c が求められる。

$\sum X^2 = 19605772$	$\sum X\lambda = 37046578$
$\sum Y^2 = 9443568$	$\sum Y\lambda = 25327868$
$\sum XY = 10357997$	$\sum \lambda = 110830$
$\sum X = 46104$	
$\sum Y = 29418$	

以上から規準方程式は

$$\left. \begin{aligned} 19605772a + 10357997b + 46104c &= 37046578 \\ 10357997a + 9443568b + 29418c &= 25327868 \\ 46104a + 29418b + 129c &= 110830 \end{aligned} \right\} \quad (4-6)$$

この規準方程式を解くと

$a = -0.784$	となるよって関数は
$b = -0.0199$	
$c = 1143.4$	

$$\lambda = -0.784X - 0.020Y + 1143.4 \quad (4-7)$$

次頁に最小二乗法による関数での計算値と標準偏差を示す。

波長(λ)	21行目	39行目	71行目	103行目	133行目	158行目	184行目	215行目	247行目	288行目	323行目	352行目	394行目	439行目	471行目	493行目
1014	1014.41	1014.83	1014.98	1015.13	1015.31	1014.82	1015.08	1014.47	1014.61	1014.58	1014.67	1014.88	1014.82	1014.71	1014.86	1015.21
854	852.90	854.11	854.26	853.62	854.59	854.88	855.15		853.89	854.64						854.49
840	839.57	839.22	839.36	838.73	838.91	839.20	840.25		840.56	839.75	839.84					
810	809.78	810.21	809.57	811.29	811.47	810.19	809.67	809.84	809.20	809.96	808.48	810.25	810.98			
735	732.95	732.59	733.52	733.67	733.86	734.14	734.41	734.58	733.94	733.91	733.21	733.42	733.37	733.26	733.40	733.75
708	707.86	708.29	707.65	707.80	707.99	708.27	709.32	708.71	708.85	708.82	708.12	708.33	709.06	708.95	709.10	709.45
750	751.77	752.19	751.56	752.49	751.89	751.39	750.87	751.04	750.40	750.37	751.24	750.67	751.40	750.50	750.65	750.21
950	949.33	949.76	949.91	949.27	949.46	948.96	949.23	949.39	948.76	948.72	948.81	948.24	948.18	948.07	949.00	949.35
1053	1052.04	1051.68	1051.83	1052.76	1052.95	1053.23	1053.50	1054.45	1053.81	1053.78	1053.08	1053.29	1053.24	1051.56	1052.49	1052.84

表 4-19. VIS の最小二乗法での関数による計算上の対応値

波長(λ)	21行目	39行目	71行目	103行目	133行目	158行目	184行目	215行目	247行目	288行目	323行目	352行目	394行目	439行目	471行目	493行目
1014	0.41	0.83	0.98	1.13	1.31	0.82	1.08	0.47	0.61	0.58	0.67	0.88	0.82	0.71	0.86	1.21
854	-1.10	0.11	0.26	-0.38	0.59	0.88	1.15		-0.11	0.64						0.49
840	-0.43	-0.78	-0.64	-1.27	-1.09	-0.80	0.25		0.56	-0.25	-0.16					
810	-0.22	0.21	-0.43	1.29	1.47	0.19	-0.33	-0.16	-0.80	-0.04	-1.52	0.25	0.98			
735	-2.05	-2.41	-1.48	-1.33	-1.14	-0.86	-0.59	-0.42	-1.06	-1.09	-1.79	-1.58	-1.63	-1.74	-1.60	-1.25
708	-0.14	0.29	-0.35	-0.20	-0.01	0.27	1.32	0.71	0.85	0.82	0.12	0.33	1.06	0.95	1.10	1.45
750	1.77	2.19	1.56	2.49	1.89	1.39	0.87	1.04	0.40	0.37	1.24	0.67	1.40	0.50	0.65	0.21
950	-0.67	-0.24	-0.09	-0.73	-0.54	-1.04	-0.77	-0.61	-1.24	-1.28	-1.19	-1.76	-1.82	-1.93	-1.00	-0.65
1053	-0.96	-1.32	-1.17	-0.24	-0.05	0.23	0.50	1.45	0.81	0.78	0.08	0.29	0.24	-1.44	-0.51	-0.16

標準偏差 1.014nm

表 4-20. VIS の実際の測定値との差と標準偏差

NIR の最小二乗法を利用した関数の導入

NIR の基本的な式は λ (波長) = aY (行) + bX (列) + $1c$ である。このとき、NIR のデータ数は 80 個である。よって、規準方程式は式(4-6)となる。このうち、波長、行、列は測定済み(表 4-6)であるため規準方程式は式(4-7)のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \sum Y^2 a + \sum XY b + \sum Y c &= \sum Y \lambda \\ \sum XY a + \sum X^2 b + \sum X c &= \sum X \lambda \\ \sum Y a + \sum X b + 80 c &= \sum \lambda \end{aligned} \right\} \quad (4-8)$$

∴ それぞれに対応する値を代入すれば係数 a, b, c が求められる。

$\sum Y^2 = 1468962$	$\sum Y \lambda = 13611114$
$\sum X^2 = 1130808$	$\sum X \lambda = 11680403$
$\sum XY = 1025871$	$\sum \lambda = 105705$
$\sum Y = 9318$	
$\sum X = 8840$	

以上から規準方程式は

$$\left. \begin{aligned} 1468962a + 1025871b + 9318c &= 13611114 \\ 1025871a + 1130808b + 8840c &= 11680403 \\ 9318a + 8840b + 80c &= 105705 \end{aligned} \right\} \quad (4-9)$$

この規準方程式を解くと

$a = 3.387$	となるよって関数は
$b = 0.083$	
$c = 917.65$	

$$\lambda = 3.526Y - 0.074X + 905.69 \quad (4-10)$$

次頁に最小二乗法による関数での計算値と標準偏差を示す。

波長	40列目	55列目	75列目	89列目	104列目	118列目	134列目	148列目	164列目	178列目
1014	1012.42	1013.66	1015.32	1013.10	1014.34	1015.51	1013.45	1014.61	1012.55	1013.71
1053	1053.06	1054.31	1055.97	1053.74	1054.99	1052.76	1054.09	1055.25	1053.19	1054.36
1129	1127.58	1128.82	1130.48	1128.26	1129.50	1127.28	1128.61	1129.77	1127.71	1128.87
1245.5	1246.12	1243.98	1245.64	1243.42	1244.66	1245.82	1243.76	1244.93	1246.25	1244.03
1367	1364.67	1365.91	1367.57	1365.35	1366.59	1364.37	1365.70	1363.47	1364.80	1365.96
1530	1530.63	1531.88	1530.15	1531.31	1532.56	1530.33	1531.66	1532.82	1530.76	1531.92
1540	1540.79	1542.04	1540.31	1541.47	1539.33	1540.49	1541.82	1539.59	1540.92	1542.08
1692	1689.82	1691.06	1692.72	1690.50	1691.74	1692.91	1690.85	1692.01	1689.95	1691.11

表 4-21. NIR の最小二乗法での関数による計算上の対応値

波長	40列目	55列目	75列目	89列目	104列目	118列目	134列目	148列目	164列目	178列目
1014	-1.58	-0.34	1.32	-0.90	0.34	1.51	-0.55	0.61	-1.45	-0.29
1050	0.06	1.31	2.97	0.74	1.99	-0.24	1.09	2.25	0.19	1.36
1129	-1.42	-0.18	1.48	-0.74	0.50	-1.72	-0.39	0.77	-1.29	-0.13
1245.5	0.62	-1.52	0.14	-2.09	-0.84	0.32	-1.74	-0.58	0.75	-1.47
1367	-2.33	-1.09	0.57	-1.65	-0.41	-2.63	-1.31	-3.53	-2.20	-1.04
1530	0.63	1.88	0.15	1.31	2.55	0.33	1.66	2.82	0.76	1.92
1540	0.79	2.04	0.31	1.47	-0.67	0.49	1.82	-0.41	0.92	2.08
1692	-2.18	-0.94	0.72	-1.50	-0.26	0.91	-1.15	0.01	-2.05	-0.89

標準偏差 1.388m

表 4-22. NIR の実際の測定値との差と標準偏差

式(4-1)、(4-2)の平均を利用し導入した関数の標準偏差と式(4-7)、(4-10)の最小二乗法を利用し導入した関数の標準偏差を比較したものを表4-23に示す。この結果から、最小二乗法による関数を使用することとした。また、この結果から波長は2nmの誤差を含むといえる。

	VIS	NIR
平均	1.019	1.388
最小二乗法	1.014	1.389

表4-23. 平均による関数と最小二乗法による関数の標準偏差の比較

4-3. VIS、NIR の空間対応調査

分光観測を行う際、VIS と NIR では画素数が異なるためスリットを通った光が画面上のどこに現れるのか調査しなければならない(図 4-13)。調査方法は波長対応調査と同様である。

はじめに VIS、NIR によってスリットの左から右へ順に撮像を行う。このとき撮像装置を XY ステージの微調整ねじで光軸に対して直角に 12.5~16.5mm まで 0.5mm 刻みで平行移動を行う。VIS の画面にスペクトルが現れるのが XY ステージの目盛り 12.2~16.85 であったため撮像範囲を 12.5~16.5mm と決定した。

VIS、NIR のスペクトル画像の中心をととも 4-2-1. と同様に調査する。VIS は 200、300、400、500 列目、NIR は 50、100、150、200 行目における最大輝度値を調査しその平均を中心とした。

表 4-24・25 および図 4-15~17 に調査結果を示す。調査結果から、VIS、NIR の位置対応は 1pix 以下の誤差範囲内で対応していることがわかった。

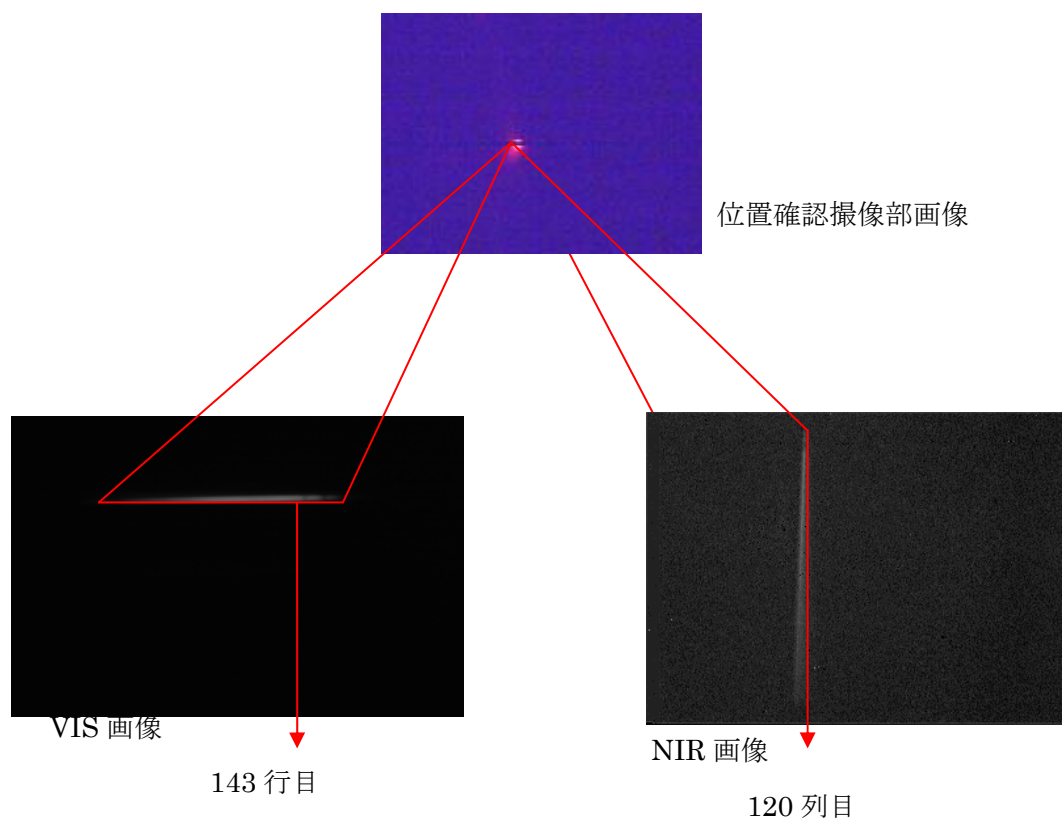


図 4-14. VIS、NIR の空間対応図(例：目盛り 13.5mm)

目盛り	200列目	300列目	400列目	500列目	平均
12.5	33	32	32	34	33
13	88	87	86	88	87
13.5	143	142	142	144	143
14	198	197	198	198	198
14.5	252	251	251	253	252
15	307	307	305	308	307
15.5	362	361	363	363	362
16	416	415	415	417	416
16.5	471	470	469	472	471

表 4-24. VIS の空間対応

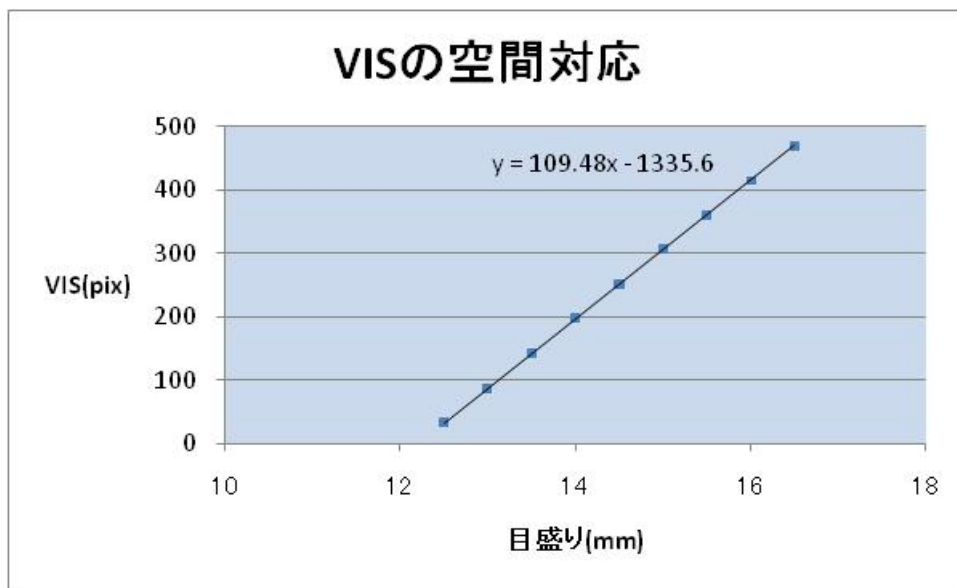


図 4-15. VIS の空間対応

目盛り	50行目	100行目	150行目	200行目	平均
12.5	144	144	144	143	144
13	132	132	131	131	132
13.5	120	120	120	119	120
14	107	107	107	106	107
14.5	96	96	95	95	96
15	84	84	83	83	84
15.5	72	72	72	71	72
16	60	60	59	59	60
16.5	48	48	48	47	48

表 4-25. NIR の空間対応

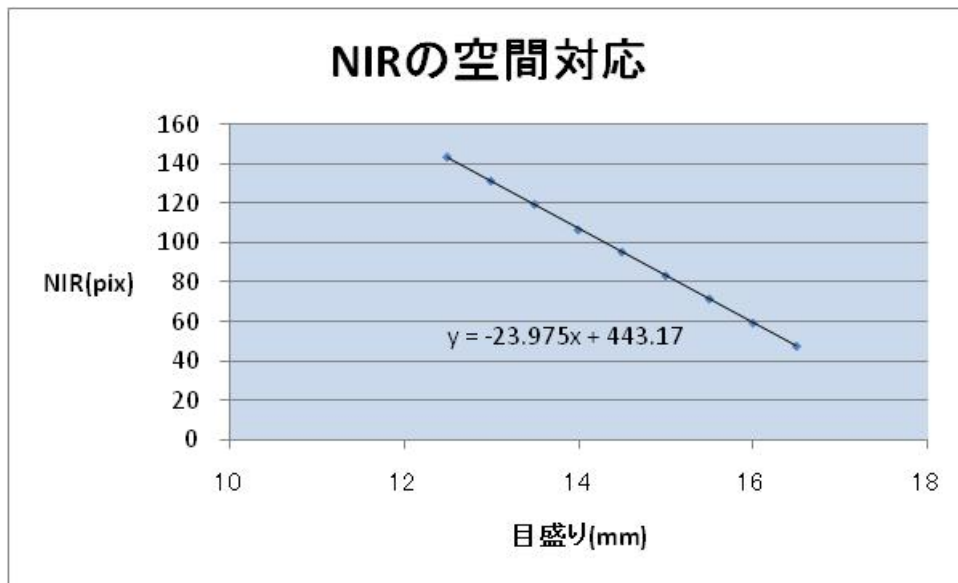
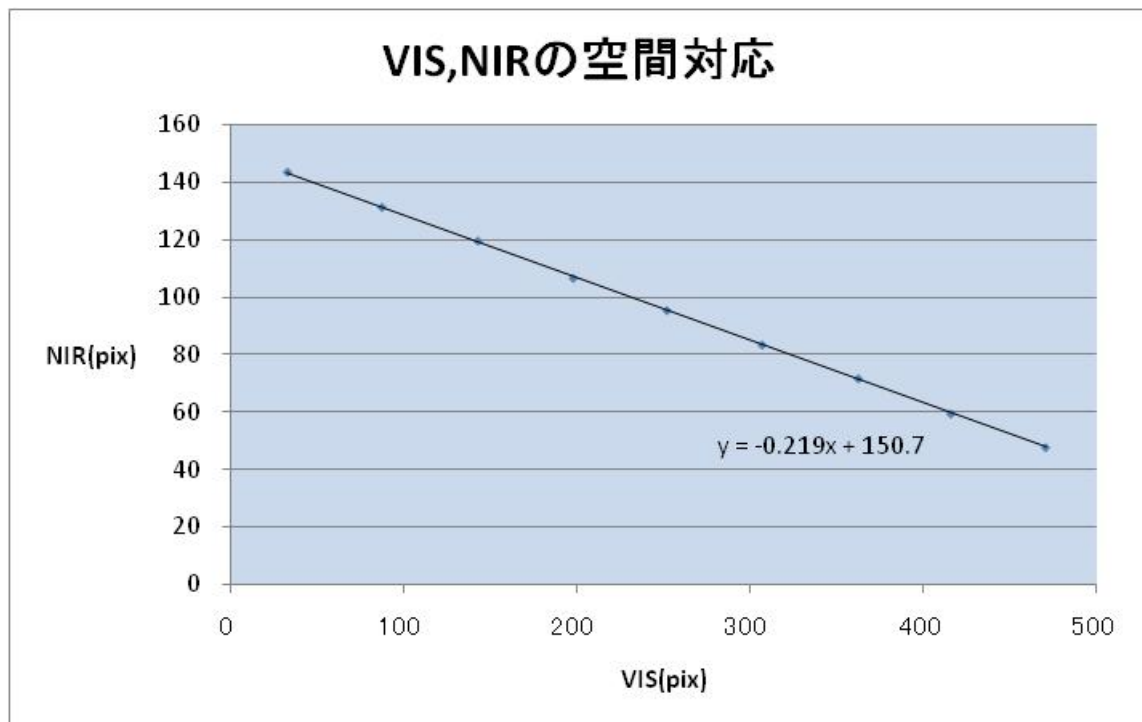


図 4-16. NIR の空間対応



標準偏差 0.29pix (NIR)

図 4-17. VIS、NIR の空間対応と標準偏差

5. 結果とまとめ

本研究において VIS、NIR 焦点位置調整、波長対応調査、空間対応調査を行うことができた。結果は以下の通りである。

焦点位置調整

VIS : 9 目盛り目

NIR : 10.5 目盛り目

波長対応調査 (λ : 波長、X : 列、Y : 行)

VIS : $\lambda = -0.784X - 0.020Y + 1143.4$

NIR : $\lambda = 3.526Y + 0.074X + 905.69$

空間対応調査 (X : VIS 行番号、Y : NIR 列番号)

$Y = -0.219X + 150.7$

以上のように結果を出すことができた。しかし、実際に月面を連続分光撮像するまでには至らなかった。今回の性能評価を踏まえて、月面連続分光画像の解析を行いデータの取得をすることが今後の課題となる。

参考資料

- [1] 「理科年表 平成 20 年度」 国立天文台 編(2008)
- [2] 「惑星地質学」 宮本英昭 ほか(2008)
- [3] 「JAXA」 <http://www.jaxa.jp/>
- [4] 「NASA」 <http://www.nasa.gov/>
- [5] 「個体惑星初期進化過程の研究手法」 杉原 孝充(2005)
- [6] 「月の科学」 水谷 仁(2000)
- [7] 「図解リモートセンシング」 日本リモートセンシング研究会 編(1992)
- [8] 「月の分光探査データを用いた岩石組成の解析・研究について」
大嶽 久志
- [9] 「Compositional Diversity and Stratigraphy of the Lunar Crust Drived from Reflectance Spectroscopy」 C.M.Piters(1993)
- [10] 「Estimation of grain sizes and mixing ratios of fine powder mixtures of common geologic minerals」 Takahiro Hiroi , C.M.Pieters(1994)
- [11] 「月面分光撮像システムの構築および画像解析による月面表層物質の組成分布調査」
松下 真人(2002)
- [12] 「月面分光撮像装置の開発」
齋藤 正晴(2003)
- [13] 「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作成」
松下 真人(2004)
- [14] 「連続分光イメージャを用いた地上観測による月面表層鉱物の広域分布調査」
齋藤 正晴(2005)

- [15] 「冷却 CCD 入門」 福島 英雄(1996)
- [16] 「KAF-0401E 768(H)x512(V)Pixel Full-Frame CCD Image Sensor Performance Specification」 Kodak(2002)
- [17] 「SU320M-1.7RT InGaAs NIR MiniCamera」 SUInc.

謝辞

本研究を進めるにあたり、適切な御助言、懇切丁寧な御指導をいただいた宮城教育大学教育学部惑星科学研究室の高田淑子教授に深く感謝いたします。

また、同大学化学科の池山剛教授には、本研究で使用した実験機材を使用させていただくなど、様々な面から御支援いただいたことに深く感謝いたします。

ならびに、研究活動全体を通して御指導・御意見、暖かい御援助をしてくださいました同研究室の齋藤弘一郎さん、伊藤友美さん、相田知樹君、門脇駿君、桑原永介君に深く感謝いたします。

最後に、本研究でお世話になったすべての関係者の方に深く感謝いたします。

付録

ENVIによる画像解析の手順

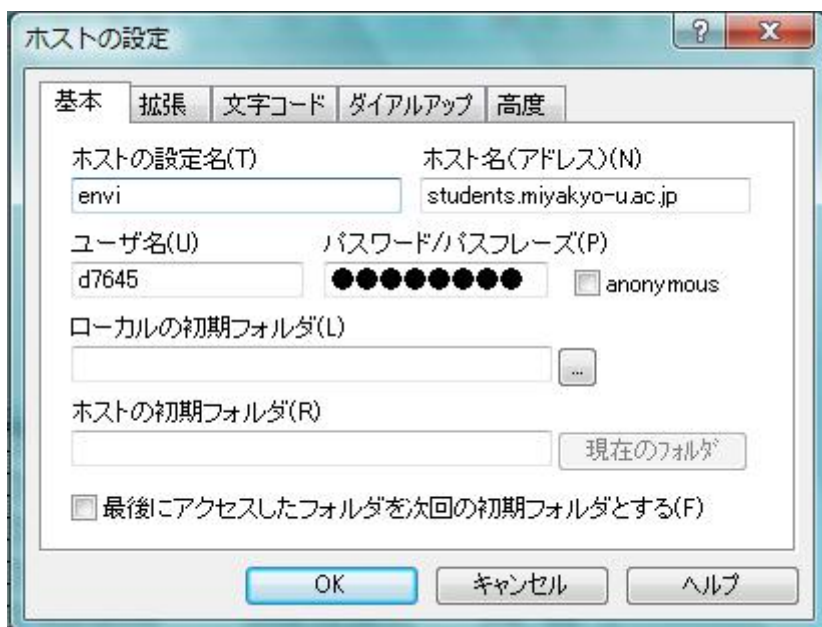
1. 準備

ENVI による画像解析を行うにあたって準備を行う必要がある。

- i . students サーバへの画像の転送
- ii . FUJITSU PC-X のダウンロード

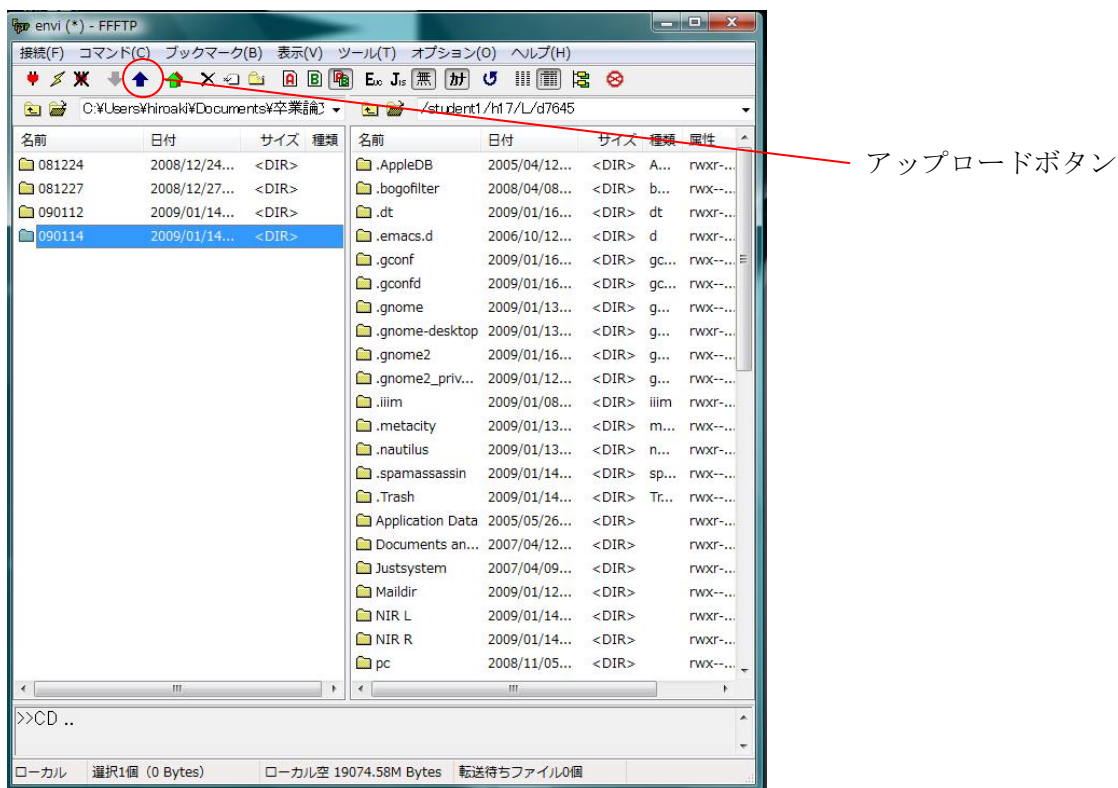
i . students サーバへの画像の転送

ENVI は students サーバ上で行うため画像の転送を行う必要がある。画像の転送には FFFTP を使用する。FFFTP 上の設定は以下の図のように行う。



ホストの設定名は好きなように設定。今回はわかりやすく **envi** とした。
ホスト名は **students.miyakyo-u.ac.jp**。
ユーザ名は自分の学籍番号。パスワードは学校の **PC** のパスワードを使用する。

FFFTP で接続を行うと以下のような画面に移る。左が自分の PC で右が students 上の PC である。右の欄から転送したい画像またはフォルダを選択しアップロードを行う。



以上の手順で画像の転送を行う。

※学校の PC はディスク使用量が決まっているため 700MB を超えないように注意する。

ii. FUJITSU PC-X のダウンロード

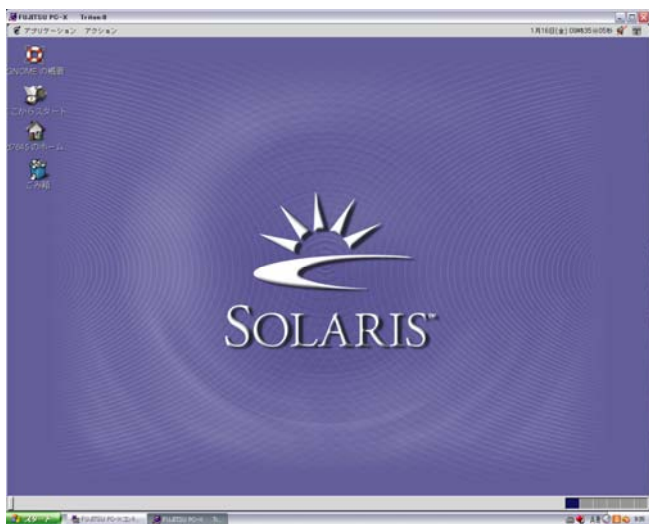
students サーバ上で作業を行うために Windows 上で X-Window アプリケーションを使用することのできる FUJITSU PC-X 体験版を

<http://software.fujitsu.com/jp/pcx/tryout/tryoutdownload.html>

よりダウンロードする。ダウンロード方法についてはホームページを参照。

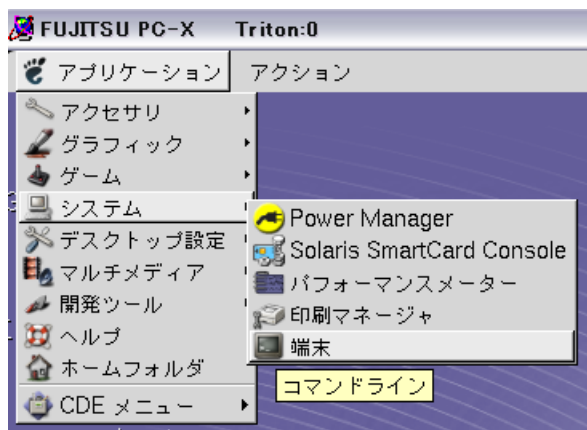
2. ENVI の立ち上げ方

ENVI を立ち上げるために FUJITSU PC-X を使用する。FUJITSU PC-X コントロールパネルを開きログイン画面に移る。ユーザ名とパスワードは学籍番号と学校の PC のパスワードを使用。以下の画面が接続したときの画面である。



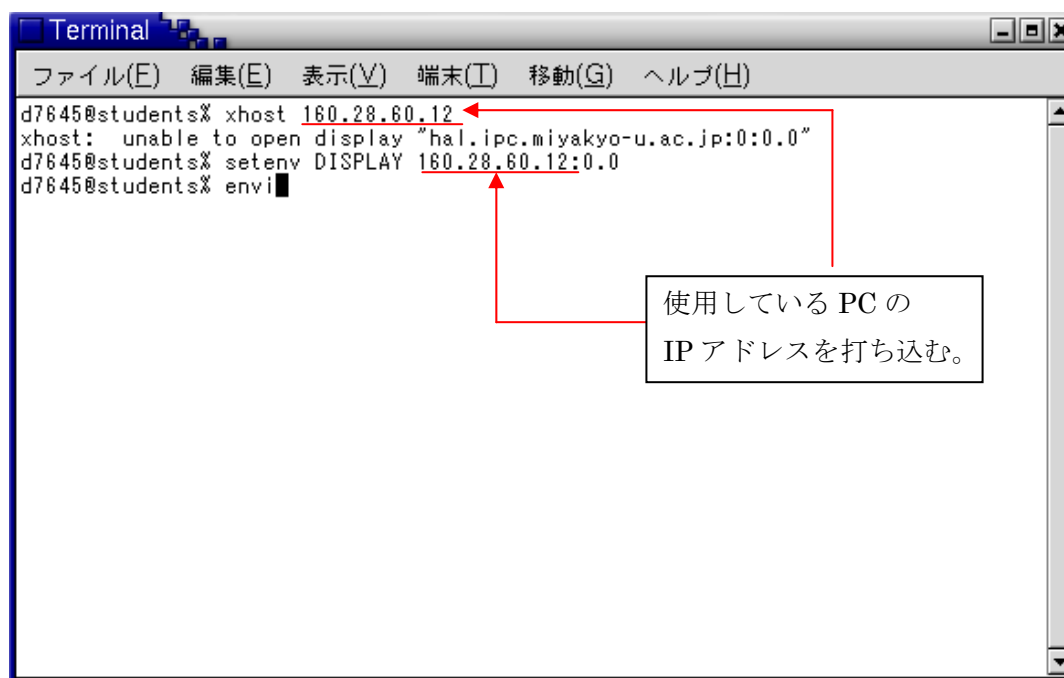
ENVI の立ち上げには端末エミュレータを使用する。端末エミュレータは以下の方法で開くことができる。

左上のアプリケーション→システム→端末



端末エミュレータを開いたら以下のように打ち込む。

```
学籍番号@student% xhost (使用している PC の IP アドレス)
学籍番号@student% setenv DISPLAY (使用している PC の IP アドレス)
学籍番号@student% envi
```



The image shows a terminal window titled "Terminal" with a menu bar containing "ファイル(E)", "編集(E)", "表示(V)", "端末(T)", "移動(G)", and "ヘルプ(H)". The terminal output is as follows:

```
d7645@student% xhost 160.28.60.12
xhost: unable to open display "hal.ipc.miyakyo-u.ac.jp:0:0.0"
d7645@student% setenv DISPLAY 160.28.60.12:0.0
d7645@student% envi
```

Red arrows point from a text box to the IP address "160.28.60.12" in the first command and the IP address "160.28.60.12" in the second command.

使用している PC の
IP アドレスを打ち込む。

以上の手順で ENVI を立ち上げることができる。

3. ENVI によるデータ取得

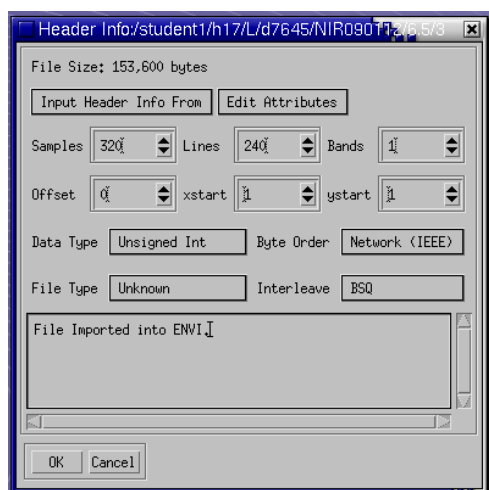
ENVI を立ち上げたらデータ取得に移る。今回必要なものはスペクトル画像の輝度値データである。データ取得の方法を以下に示す。

- i. 画像の展開
- ii. Profile の表示と保存

i. 画像の展開

ENVI での画像の展開には以下の方法で行う。

file から open image file を選択し開きたい画像を選択する。選択すると以下のような画面が表示される。



画像に応じて以下のように値を変えていく。

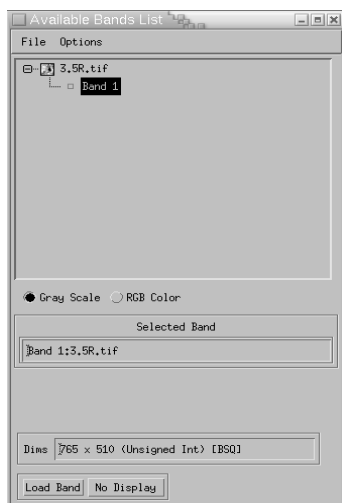
VIS の画像の場合

Samples **765**
Lines **510**
Bands **1**
Offset **0**
X start **1**
Y start **1**
Data type **Unsigned Int**
Byte order **Network(IEEE)**
File type **TIFF**
Inter level **BSQ**

NIR の画像のとき

Samples **320**
Lines **240**
Bands **1**
Offset **0**
X start **1**
Y start **1**
Data type **Unsigned Int**
Byte order **Network(IEEE)**
File type **Unknown**
Inter level **BSQ**

以上のように設定すると以下の画面に移る。

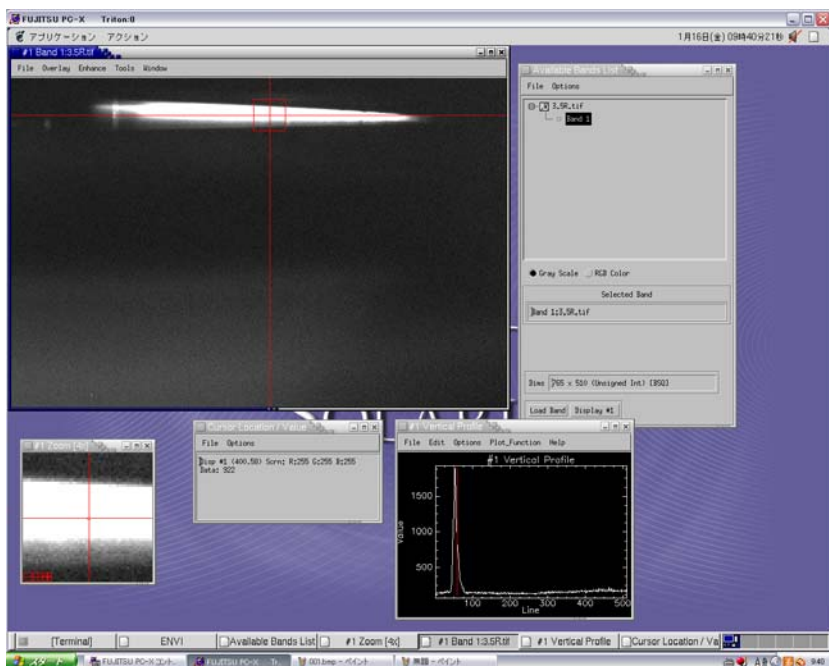


左下の Load Band をクリックすると画像が表示される。

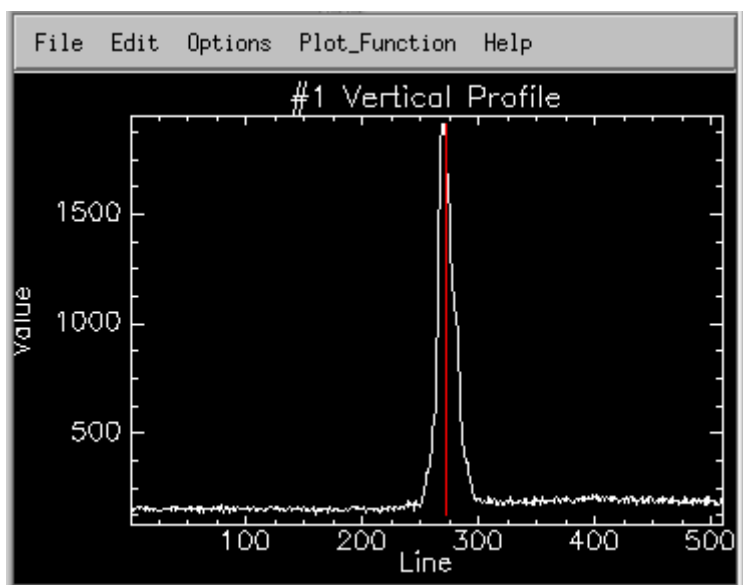
ii . Profile の表示と保存

今回必要な輝度値は X・Y 座標における pixel ごとの輝度値データである。このデータの取得については以下の方法で行う。

画像を展開したら、Tools→Profiles→X・Y profile...を選択する。VIS 画像は X 軸と平行にスペクトル画像が現れるので Y profile...を、NIR 画像は Y 軸と平行にスペクトル画像が現れるので X profile...をそれぞれ選択する。次に画像上でダブルクリックを行うと座標を表示させることができるので任意の座標(列・行)を選択する。以上の操作を行うと以下のような画面に移る。



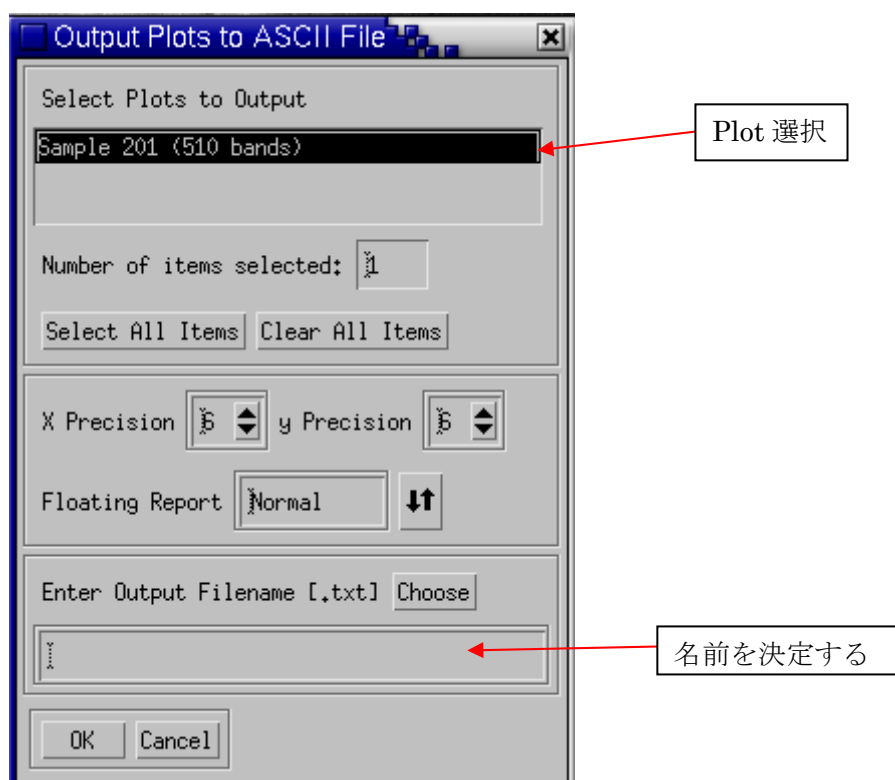
画面上右下のグラフが輝度値データとなる。以下に拡大したものを示す。



このデータを保存するには以下の操作を行う。

File→Save Plot As→ASCII...

この操作を行うと以下のような画面に移る。



Plot を選択し名前を決定して OK をクリックすれば保存される。

4. Excel による輝度値の解析

ENVI によって輝度値のデータを取得したら FFFTP を使用して students 上の保存したデータを自分の PC に転送する。以下は転送されたファイルの中身である。ファイルは PC のメモ帳を使用して開くことができる。このデータを Excel で読み込みデータの解析を行う。

```
ENVI ASCII Plot File [Wed Jan 14 19:31:32 2009]
Column 1: Line
Column 2: Sample 300~~1
 1.000000 136.000000
 2.000000 153.000000
 3.000000 148.000000
 4.000000 133.000000
 5.000000 148.000000
 6.000000 158.000000
 7.000000 147.000000
 8.000000 152.000000
 9.000000 155.000000
10.000000 144.000000
11.000000 147.000000
12.000000 138.000000
13.000000 146.000000
14.000000 152.000000
15.000000 129.000000
16.000000 162.000000
17.000000 157.000000
18.000000 153.000000
19.000000 154.000000
20.000000 154.000000
21.000000 141.000000
22.000000 137.000000
23.000000 164.000000
24.000000 140.000000
25.000000 159.000000
```