

学位論文

はやぶさ探査機搭載近赤外線分光器の開発
と小惑星イトカワの近赤外線分光観測

Development of Near-Infrared Spectrometer
onboard Hayabusa Spacecraft and
Near-Infrared Spectral Observation of
Asteroid Itokawa

平成 18 年 7 月 論文博士（理学）申請

東京大学大学院理学系研究科

安部 正真

謝辞

本研究を博士論文としてまとめるにあたって、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部固体惑星科学研究系主幹の加藤學教授には、全面的にお世話になりました。また論文の審査にあたり、東京大学の宮本正道教授、杉浦直治教授、宇宙科学研究本部の早川基教授、吉川真助教授には有益なコメントを戴きました。

本研究は、小惑星探査機はやぶさに搭載された近赤外線分光器の開発と、この装置を用いて観測された小惑星イトカワの分光データの初期成果をまとめたものです。本研究を進めるにあたって、はやぶさミッションの遂行に携わった全ての方の協力がなければ、成り立たなかったものと感じています。特に、昨年度宇宙科学研究本部を退職された藤原顯博士には、はやぶさミッションのプロジェクトサイエンティストとして、科学面の取りまとめや、本分光器のはやぶさ搭載にあたって、多大なるご尽力をいただきました。

本分光器の開発の初期検討には、松浦周二博士、石橋之宏博士を始め多くの方に協力をいただきました。光学系の初期検討にはジェネシア（株）の武山芸英さんに、グリズムの設計には理化学研究所の海老塚昇博士に多くの情報をいただきました。InGaAs 検出器の製作は浜松ホトニクス（株）によって行われ、田中章雅さんに検出器に関する多くの情報をいただきました。分光器の製作は、(株)東芝(現 NEC 東芝スペースエンジニアリング(株))によって行われ、津野克彦さん、神田成治さんを始めとする多くの方にご協力いただいています。分光器の最終的な光学設計は株式会社トプコンによって実施されています。光学素子のひとつであるグリズムの製作は海外メーカーである、リチャードグレードソラボラトリ社に国内の代理店を介して発注製作しました。分光器のプロトモデルの評価試験には、尾島隆信さんや高木周さんにデータ取得の面で協力いただいています。光学素子の放射線照射試験では一色賢也さんに協力していただきました。

東邦学園大学の高木靖彦教授には本分光器の開発初期から現在まで長期間にわたって協力していただきました。特に、本分光器のハードウェアの制御とデータ取得に関する搭載ソフトウェア製作に中心的な役割を担っていただきました。山本幸生博士にはバスシステムとのインターフェースに関する部分のソフトウェア製作に関して協力いただきました。

神戸大の阿部新助博士には、本分光器のデータ取得に関する地上系ソフトの製作などで協力いただいています。東京大学の北里宏平さんには、データ解析に関するソフトの製作などで協力いただいています。ブラウン大の廣井孝弘博士には取得データの解釈や隕石データの提供などで大変お世話になりました。

はやぶさの本分光器のデータ解析チームには海外の研究者を含む 13 名の研究者がいます。本研究は、データ解析チームの議論を経てまとめられています。

本分光器の開発・製作からデータ取得およびその解釈にいたるまで、10 年以上という長期間がかかっています。その間、私の所属する固体惑星科学研究系スタッフには、研究の面のみならず多くのサポートをいただきました。特に矢野創博士、岡田達明博士には、同

じはやぶさミッションチームの一員としてもさまざまな面で助けていただきました。

最後に妻や家族の支えがあったことも忘れることができません。

多くの人の協力によって、本研究をまとめることができたことに、心から感謝いたします。

Abstract

小惑星は惑星のように形成の過程で大きな熱変成を経験しておらず、太陽系の比較的初期の情報を保持した天体であると考えられている。また小惑星は太陽系の広い範囲に分布しており、その形成場所による物質の違いの情報を持っていると考えられている。したがって、小惑星の構成物質や状態を調べることにより、太陽系の初期の物質分布や状態に関する情報を得ることができ、太陽系の形成と進化に対して大きな制約を与えることができると考えられる。このような観点で進められてきた、小惑星の構成物質を推定する研究のひとつが、小惑星の反射スペクトルの研究である。

小惑星の反射スペクトルの研究は、主に地上望遠鏡を用いた観測によって進められてきたが、小惑星表面を空間分解して観測するのが非常に困難であるため、表面の鉱物種推定や隕石との対応関係の推定には限界があった。本研究では小惑星近傍に到達する探査機に搭載する近赤外線分光器を設計・開発し、小惑星表面を空間分解して観測することに成功した。

本研究で開発した近赤外線分光器の観測波長は764~2247 nm (2100 nmより長波長は検出器のカットオフ波長により感度が低い)で、波長分解能は23.56 nmであり、小惑星の主要鉱物種であると考えられているケイ酸塩鉱物の吸収バンドを解析することが可能である。また視野サイズは0.1度で、高度5 kmの距離から9 m程度の空間分解能を持ち、直径500 m程度の大きさの小惑星を十分空間分解して観測することが可能である。

探査機の打ち上げ前には、分光器の性能評価試験を実施し、分光器の感度特性などの、小惑星近傍での観測データを解析するために必要なデータを取得し、打ち上げ後も性能モニタ観測などを実施して、打ち上げ前から性能に大きな変化がないことも確認した。

本分光器は2003年5月9日に宇宙科学研究所(現在の宇宙航空研究開発機構)によって打ち上げられた小惑星探査機はやぶさに搭載され、2005年9月から11月にかけて、S型小惑星イトカワの近傍観測を行った。

本分光器で得られた小惑星イトカワの平均的な反射スペクトルと、LL5コンドライトの反射スペクトルとを比較した結果、S型小惑星であるイトカワの表面物質について、普通コンドライトとの対応関係を支持する結果が得られた。

本分光器で得られたイトカワの平均的な反射スペクトルにおける1 μ m帯の吸収係数強度比を、普通コンドライトや始原的エイコンドライト、輝石・カンラン石混合物における値と比較したところ、イトカワの表面物質は、カンラン石の割合が高く、同じS型小惑星であるエロスに比べてもカンラン石を多く含んだ小惑星であることが分かった。また輝石・カンラン石の割合から、普通コンドライトの中ではLLコンドライトに対応し、これまでに発見されている始原的なエイコンドライトとは対応しないことが分かった。

一方、空間分解した観測では、反射率や吸収バンドの深さ、スペクトルの傾きに10%以上の変化があることがわかった。これはこれまでに探査機で探査されたS型小惑星に比べ

て大きい。光学カメラの情報から、イトカワの表面は岩塊の多い領域と、平坦な領域に分けられ、岩塊の多い領域には反射率の高い部分と低い部分があることがわかっており、本分光器でもそれぞれに対応する領域の反射スペクトルを取得することに成功した。

本分光器の観測結果から、3つの代表的な領域は反射率の違い以外に、1 μ m 帯の吸収バンドの深さやスペクトルの傾きに違いがあることが分かった。この違いは、表面の粒子サイズの違いや、宇宙風化作用の程度の違いに原因があると考えられる。ただし、吸収係数強度比を調べた結果では、3つの領域に大きな違いはなく、輝石・カンラン石の存在比に違いがないことも分かった。

本研究をまとめると以下のようなになる。

- ・はやぶさ探査機搭載近赤外線分光器を開発した。
- ・打ち上げ前の性能評価を実施し、小惑星の観測に適した分光器ができたことを確認した。
- ・打ち上げ後も性能モニタを実施し、小惑星到着までその性能を維持していることを確認した。
- ・S型小惑星イトカワ近傍での近赤外線分光観測を実施し、地上では得ることのできなかつた、空間分解した反射スペクトルの取得を含む、初期成果を得ることができた。
- ・その初期成果とは、イトカワ表面物質に対応する隕石はLL 普通コンドライトが尤もらしいことを明らかにし、その表面状態には、粒子サイズや宇宙風化の程度の違いによる大きな変化があるものの、鉱物組成的には一様で、S型小惑星イトカワは、分化を経験していない始原的な天体であると考えられることである。

Abstract

Many asteroids are primitive bodies having experienced only mild thermal processes since their formation. They are distributed widely in the solar system, and may have information on the physico-chemical conditions of the birth-places. Therefore, the evolution of the solar system may be elucidated by explorations of asteroids. Reflectance spectra are one of the most useful tools for investigating materials and conditions of asteroids.

Studies of reflectance spectra of asteroids have been mainly advanced by ground-based observations. There are, however, limits to such investigations because surface of small asteroids are hardly resolved spatially. Consequently, mineral assemblages on asteroidal surfaces could not be determined accurately and hence the relationship between asteroids and meteorites remained uncertain. In this study, a near-infrared spectrometer onboard the spacecraft Hayabusa was designed and manufactured. It successfully obtained spatially resolved spectra of the asteroid Itokawa.

Observational wavelength of the spectrometer is between 764 and 2247 nm. The sensitivity of the spectrometer is low at longer than 2100 nm because of the cutoff wavelength of the detector. The wavelength resolution is 23.56 nm. This spectrometer can detect the absorption bands for pyroxene and olivine which are centered at 1 μm and 2 μm , respectively. The field of view is 0.1 degrees, and the spatial resolution is about 9-m at a distance of 5-km from the asteroidal surface. An asteroid of about 500-m in diameter can be investigated in detail using spatially resolved spectra obtained by this spectrometer.

Before and after the launch, we obtained the performance and calibration data of this spectrometer, and confirmed the performance was not changed until the arrival at the asteroid.

We observed an S-type asteroid Itokawa from September through November, 2005, using this spectrometer onboard the Hayabusa spacecraft which was launched on May 5, 2003.

The average reflectance spectrum of asteroid Itokawa obtained by this spectrometer is similar to the reflectance spectrum of an LL5 chondrite.

The 3-band strength ratios over the 1 μm absorption band for the averaged spectrum of Itokawa were compared with those for powdered samples of ordinary chondrites, primitive achondrites, and olivine-pyroxene mixtures. From this comparison, it is found that the surface of Itokawa has an olivine-rich mineral assemblage compared with the

surface of Eros. Based on its olivine/pyroxene abundance, the material on Itokawa's surface is similar to LL5 ordinary chondrites among the known meteorites. It seems to be not similar to primitive achondrite.

From the spatially resolved data, it was found that there were variations of more than 10% in albedo and absorption band depth of the spectra. This diversity is larger than those for other S-type asteroids previously explored by spacecrafts. From the imaging data, it appears that there are three distinct areas on the surface of Itokawa. They are boulder-rich area, brighter area, and smooth area. Spectra of these distinct areas on Itokawa were obtained by this spectrometer.

From our spectral observation, it was found that there are diversities in the reflectance, band strength at 1 μm absorption band, and spectral slope among three distinct areas. The cause of these diversities is due to the difference of the particle size and/or the degree of space weathering. It is important to note that there is no significant difference of 3-band strength ratios over the 1 μm absorption band among the three distinct areas. This suggests that there is no significant difference in the olivine/pyroxene abundance.

This research is summarized as follows.

- The near-infrared spectrometer onboard the Hayabusa spacecraft was developed.
- We executed the pre-launch performance and calibration test, and confirmed that this spectrometer is suitable for the observation of the asteroid.
- We executed the performance monitor after the launch and confirmed that the performance was changeless until the arrival at the asteroid.
- Spatially resolved near-infrared reflectance spectra of the S-type asteroid Itokawa was obtained.
- Itokawa has an olivine-rich mineral assemblage similar to that of LL ordinary chondrite.
- Although there is a large variation in the surface condition of Itokawa, the mineralogical composition is homogeneous. Therefore, Itokawa has not experienced partial melting. It is a primitive body.

目次

第1章 研究の背景	1
1-1 小惑星の発見と現在の数および分布	1
1-2 小惑星の多色測光観測	4
1-3 小惑星の反射スペクトル観測	6
1-4 小惑星の分類	8
1-5 小惑星の分類と太陽からの距離およびサイズ依存性	11
1-6 小惑星の表面物質の解釈と問題点	13
1-7 S型小惑星と普通コンドライトの関係	15
1-8 サンプルリターン探査の必要性	18
1-9 本論文の構成	19
第2章 近赤外線分光器の開発	20
2-1 はやぶさミッション	20
2-2 はやぶさ搭載近赤外線分光器の目的	21
2-3 本分光器の概要	23
2-3-1 光学系	25
2-3-2 検出器	33
2-3-3 較正用ランプとLED	39
2-4 小惑星観測時のS/Nの見積もり	42
2-5 本分光器の構成	43
2-5-1 本分光器の動作概要	43
2-5-2 本分光器のブロック図とモード遷移図	43
2-5-3 本分光器の概観図	46
2-5-4 本分光器の重量・サイズ・消費電力	50
2-6 ソフトウェアの機能	51
2-6-1 ハードウェアの制御	51
2-6-2 データ取得	51
2-7 データフォーマット	54
2-8 本分光器の性能	58
2-8-1 波長ピクセル関係	58
2-8-2 感度特性	63
2-8-3 リニアリティ特性	65
2-8-4 アライメント	67

第3章 打ち上げ後小惑星到着までの運用	68
3-1 小惑星到着までの運用概要	68
3-2 基本動作チェック	70
3-3 機器アライメントチェック	74
3-4 恒星・惑星観測	76
3-5 地球・月観測	80
3-6 ランプ・LED モニタ	84
第4章 小惑星近傍での観測	87
4-1 小惑星近傍での運用の概要	87
4-2 スキャン観測	92
4-3 太陽位相角を変えた観測	95
4-3-1 太陽位相角に伴う反射率の変化	95
4-3-2 Hapke パラメータの推定	96
4-3-3 イトカワ表面の反射率の変化	100
4-3-4 イトカワにおける Opposition effect	101
4-3-5 太陽位相角に伴う赤化現象	102
4-3-6 イトカワのジオメトリックアルベド	103
4-4 タッチダウン運用	105
4-5 小惑星観測時の観測精度	107
第5章 イトカワの近赤外線反射スペクトル	108
5-1 イトカワの平均スペクトル	108
5-1-1 赤道スキャンによる平均スペクトル	108
5-1-2 地上観測データとの比較	111
5-2 NIRS の感度較正式の検証	113
5-2-1 観測条件の違いの影響	113
5-2-2 月観測データを用いた検証	114
5-2-3 クルージング中の感度変化の影響	116
5-2-4 月観測データにおける宇宙風化進行度の違いの影響	116
5-2-5 イトカワ滞在中の感度変化の影響	119
5-3 吸収係数強度比による鉱物種推定	123
5-3-1 鉱物種の推定方法	123
5-3-2 解析に用いたスペクトルデータ	123
5-3-3 反射スペクトルの特徴の抽出	128
5-3-4 吸収係数強度比と他のスペクトルの特徴との関係	130

5-3-5	吸収係数強度比プロット	133
5-4	イトカワの表面鉱物種推定	136
5-4-1	NIRS の観測波長域による制約の影響	136
5-4-2	イトカワのカンラン石・輝石存在比	136
5-4-3	イトカワの対応隕石タイプ	137
5-4-4	Alta'ameem 隕石との比較	138
5-5	イトカワの反射スペクトルの場所による違い	142
5-5-1	3つの代表的な場所のスペクトルの特徴	142
5-5-2	幾何学補正後の比較	149
5-5-3	イトカワの表面状態の違い	155
5-5-4	クローズアップ観測データの解析	155
5-5-5	イトカワ表面の宇宙風化進行度の違い	159
5-5-6	イトカワの表面の鉱物組成の違い	164
第6章	まとめ	166
Appendix 1	小惑星イトカワの地上観測データのまとめ	169
Appendix 2	NIRS のコマンド・テレメトリー一覧	173
Appendix 3	NIRS の観測パラメータ一覧	180
References		190

第 1 章 研究の背景

1-1 小惑星の発見と現在の数および分布

最初の小惑星は 1801 年 1 月 1 日にイタリアの Piazzi によって発見された。その後現在 (2006 年 5 月 15 日現在) までに 329,777 個の小惑星が発見され、軌道が計算されている (うち、軌道が確定して番号が付いているものは 129,436 個)。最初に発見された小惑星は火星と木星の間の軌道を持つ天体であったが、現在ではその分布は、水星の内側から、冥王星の外側までひろがり、太陽系の全領域に渡って分布している。

Figure 1-1-1 に小惑星の数の変遷を、Figure 1-1-2 と Figure 1-1-3 に現在の小惑星の分布図を示す。

小惑星の数は 1801 年から 1804 年にかけて 4 つの小惑星 (セレス、パラス、ジュノー、ベスタ) が続けて発見された後、1845 年に 5 つ目の小惑星アストラエアが発見されるまでは、4 個だけと思われていたが、この発見以降急速に発見が報告されるようになる。1890 年ごろからは写真観測が始まり、小惑星の発見数もさらに増加している。20 世紀半ばには再び発見数の増加が鈍っているが、1980 年ごろからは CCD を用いたサーベイ観測がスタートし、再び発見数が増加している。現在は地球に衝突する小惑星の早期発見を目的とした小惑星観測専用の望遠鏡なども作られている。

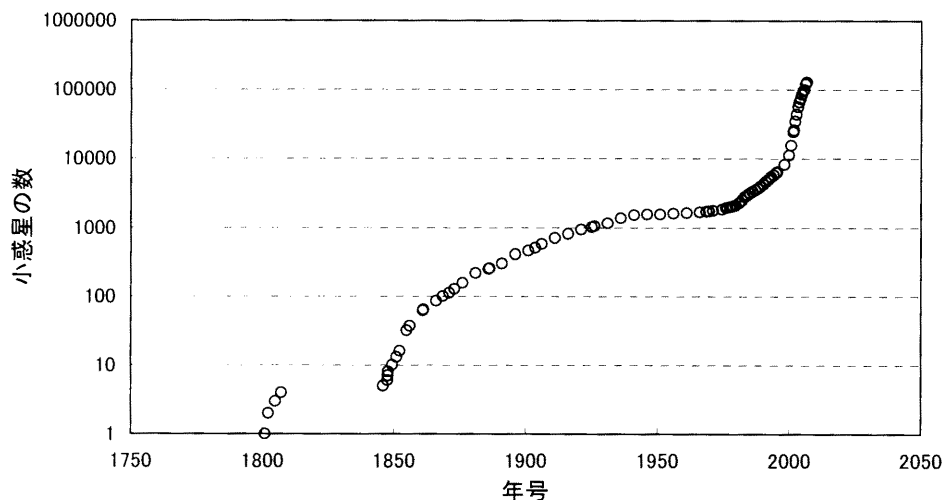


Figure 1-1-1 : Changes of the number of numbered asteroids.

小惑星の数の変遷 (軌道が確定して確定番号を得た小惑星の数をプロットした)

Figure 1-1-2 の緑色の点はいわゆる小惑星帯にある小惑星で、近日点（太陽に一番近くなる点）の太陽距離が 1.3 天文単位より小さい小惑星（これを一般に近地球型小惑星と呼ぶ）を赤い丸で表している（白抜きは 1 シーズンの観測しかなく、軌道が不確定なもの）。木星の軌道上（かつ木星の公転位置から前後 60 度離れた領域に分布している）の小惑星（これをトロヤ群天体と呼ぶ）を青い点で表している。青い四角は彗星（塗りつぶしの四角は番号の付いている周期彗星）である。

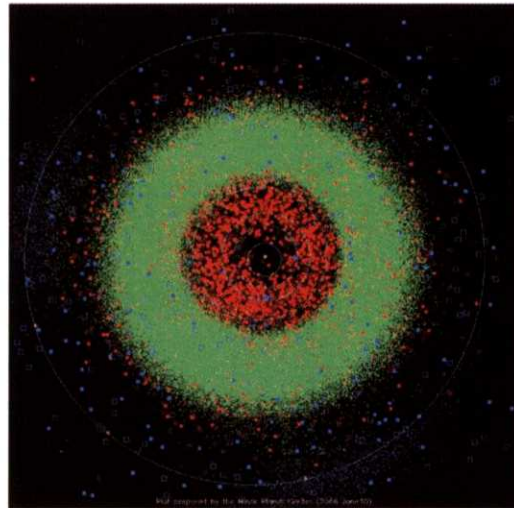


Figure 1-1-2 : Plot of the inner solar system (from MPC [1]).

小惑星の分布。一番外側の円は木星軌道。MPC のホームページより[1]。

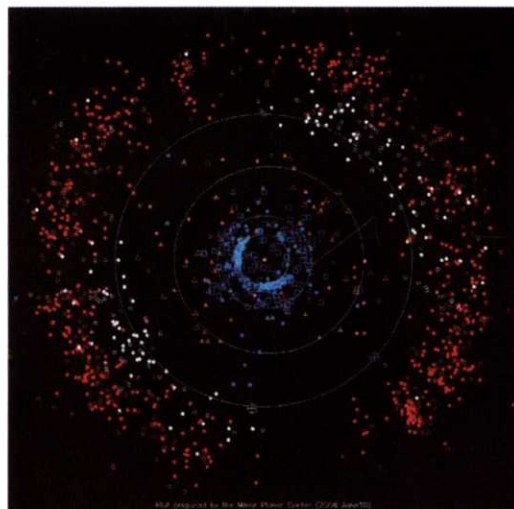


Figure 1-1-3 : Plot of the outer solar system (from MPC [2]).

小惑星の分布。一番外側の円は海王星の軌道。MPC のホームページより[2]。

Figure 1-1-3 のオレンジ色の点は木星と海王星の間の軌道にある小惑星(これらをケンタウルス族と呼ぶ)である。海王星と3:2の共鳴を受けているエッジワース・カイパーベルト天体(これらを冥王星族と呼んでいる)を白で表している。海王星の摂動で散乱させられた軌道をもつ小惑星(これらを散乱ディスク天体と呼んでいる)を紫色で表している。冥王星族以外のエッジワース・カイパーベルト天体は赤色で表している。Figure 1-1-2 と同様に、青い四角は彗星(塗りつぶしの四角は番号の付いている周期彗星)である。

1-2 小惑星の多色測光観測

小惑星の軌道についての研究は、小惑星の発見とともにすぐ始められたが、小惑星の物質に関する観測的な研究は最近になってからである。Binzel (1989)によるレビューによると、1929年にBobrovnikoff (1929)がセレスとベスタの色の違いについて言及している。その他、Chapman *et al.* (1971)のレビューによると、Watson (1938)やFischer (1941)や、Kitamura (1959)にも、小惑星の色についての言及がある。ただし、この時代の観測はまだU(中心波長 365nm)、B(中心波長 440nm)、V(中心波長 550nm)バンドなどの広帯域のフィルターを用いた多色測光による、色の議論である。UBVバンドによる小惑星の多色測光は1950年代からGehrelsやKuiperを中心に精力的に進められ一連のシリーズ論文(Groeneveld and Kuiper (1954)から始まるPhotometric Studies of Asteroidsシリーズ)として発表されている。その初期の成果はGehrels (1970)にまとめられている。

UBVバンドの観測データによる小惑星の分類はWood and Kuiper (1963), Chapman *et al.* (1971), Hapke (1971)で示唆され始めており、特にChapman *et al.* (1971)では太陽からの距離と小惑星の色の関係が、Hapke (1971)ではUBVバンドの色指数と鉱物種との関係が議論されている。

その後小惑星の多色測光は、Zellner *et al.* (1985)のEight Color Asteroid Survey (ECAS)によって、中心波長 337nm から 1041nm の範囲まで観測波長域が広げられ、小惑星の分類の議論が進んだ。また近赤外域の多色測光については、J(中心波長 1250nm)、H(中心波長 1650nm)、K(中心波長 2200nm)バンドの観測で、Veeder *et al.* (1982)やHahn *et al.* (1988)のまとめがあり、中心波長 900nm から 2300nm の範囲のSeven Color Asteroid Survey (SCAS)のまとめがClark *et al.* (1995)によってされている。

近年では、可視域ではSloan Digital Sky Survey (SDSS)や、近赤外域ではTwo Micron All Sky Survey (2MASS)などによる全天サーベイが行われており、そのデータベースを用いた小惑星の研究も進められている。前者はIvezić *et al.* (2001)およびJurić *et al.* (2002)に、後者はSykes *et al.* (2000)およびSykes *et al.* (2002)にまとめられている。

Figure 1-2-1 にSDSSで観測された小惑星の色分け方法を(Ivezić *et al.* (2002)のFig.2)示し、Figure 1-2-2 に場所よる小惑星の色の違いを示した結果(Ivezić *et al.* (2002)のFig.3)を掲載する。

Figure 1-2-1 の横軸の a^* はSDSSの観測で使用した5色フィルタ(u', g', r', i', z', それぞれの中心波長は 355.1nm, 468.6nm, 616.6nm, 748.0nm, 893.2nm)のうち4つを用いて $a^* = 0.89(g'-r') + 0.45(r'-i') - 0.57$ と定義されるカラーである。Ivezić *et al.* (2001)では $a^* < 0$ の小惑星を青い小惑星、 $a^* > 0$ を赤い小惑星として分布が二極化しているとしている。Figure 1-2-2 を見ると、太陽からの距離の遠い側に青い小惑星が多く、太陽から近い側に赤い小惑星が多いことがわかる。また太陽からの距離が同じでも軌道傾斜角が違えば、場所ごとに小惑星の色が違って、同じ色の小惑星が狭い範囲に集中している様子も見受けられる。

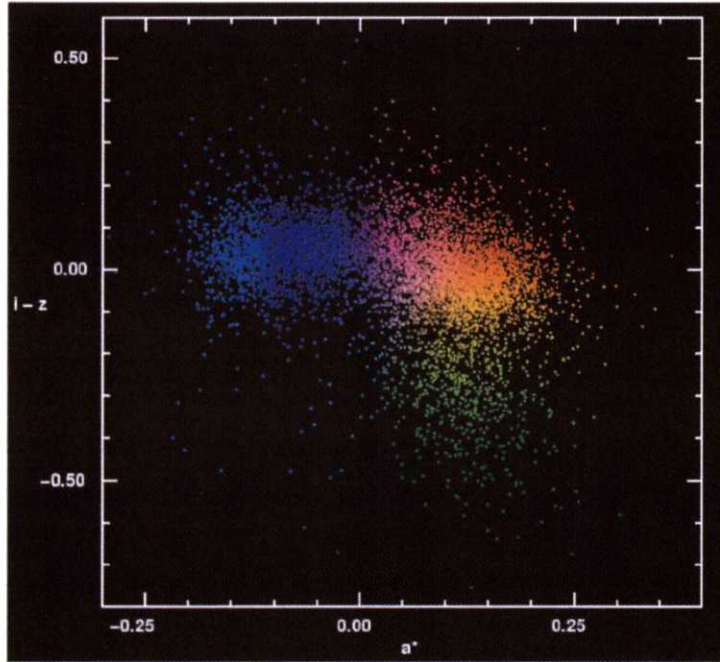


Figure 1-2-1 : Distribution of 6612 asteroids with available proper orbital elements in the space spanned by SDSS colors (from Ivezić *et al.* (2002), Fig.2).

SDSS で観測された 6612 個の小惑星の色分け(Ivezić *et al.* (2002) Fig.2 より)

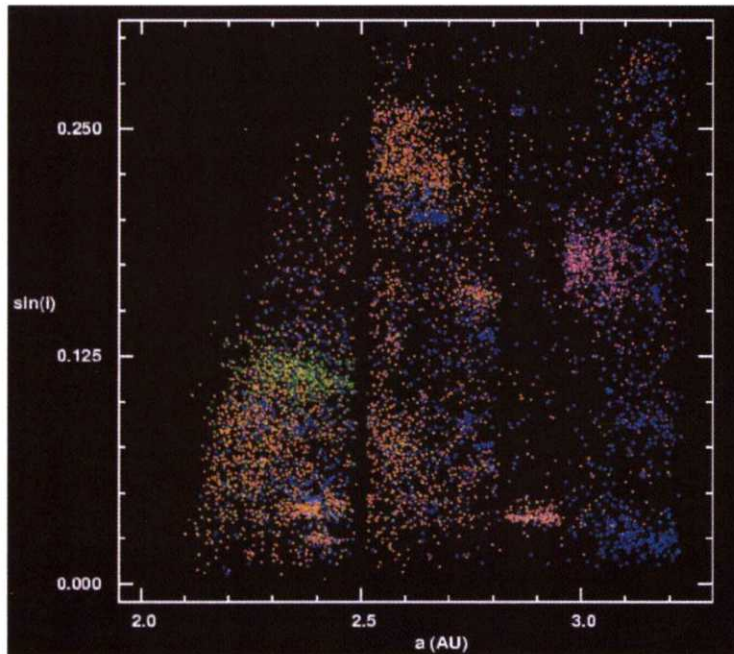


Figure 1-2-2 : Distribution of the 6612 asteroids in the space spanned by proper inclination and semimajor axis. The dots are colored according to their position in the SDSS color-color diagram shown in Fig 1-2-1 (from Ivezić *et al.* (2002), Fig.3).

SDSS で観測された 6612 個の小惑星の場所による色の違い(Ivezić *et al.* (2002) Fig.3 より)

1-3 小惑星の反射スペクトル観測

小惑星の反射スペクトル観測も、偏光観測や、熱赤外観測と同様に 1970 年代初めから McCord や Chapman らによって進められた。特に McCord *et al.* (1970) はベスタの反射スペクトルに輝石に関連する吸収を発見し、玄武岩的エイコンドライトの反射スペクトルと非常によく似ていることを示した (Figure 1-3-1)。この論文によって、反射スペクトルの研究が、小惑星表面の鉱物種推定や隕石との対応付けに非常に有力な手法であることを印象付けた。小惑星の反射スペクトル観測の初期のデータについては、Chapman and Gaffey (1979) にまとめられている。

小惑星の反射スペクトルのデータが取得できるようになると、鉱物の反射スペクトルや隕石の反射スペクトルのデータとの比較による議論が進むようになる。鉱物の反射スペクトルについては Adams (1975) に、隕石の反射スペクトルについては Gaffey (1976) に良くまとめられており、おのこの小惑星の反射スペクトルの解釈については Gaffey and McCord (1978) にまとめられている。

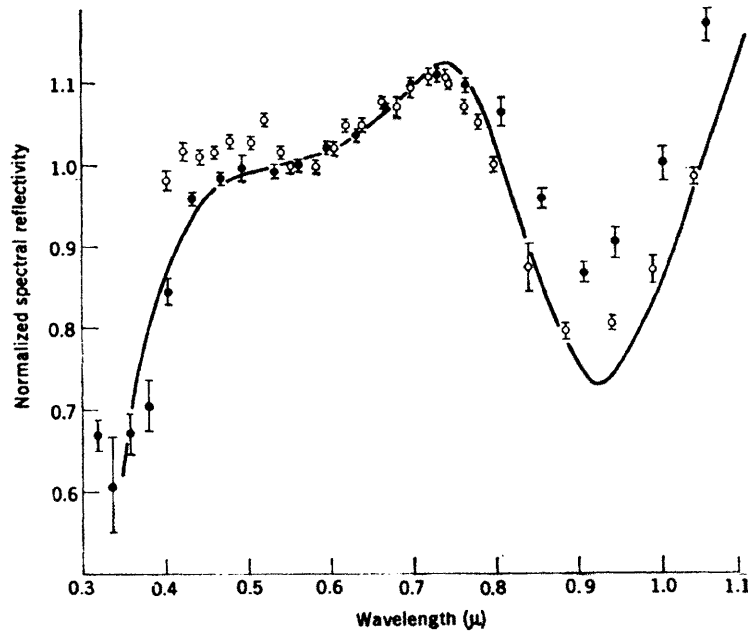


Figure 1-3-1 : Laboratory measurements of the spectral reflectivity of the Nuevo Laredo meteorite (solid line) with the telescope data points from Vesta (open and solid circles) (from McCord *et al.* (1970), Fig.3).

小惑星ベスタのスペクトル (白丸および黒丸) と玄武岩的エイコンドライトのスペクトル (実線) (McCord *et al.* (1970) Fig.3 より)

スペクトル観測については、その後も個別あるいは体系的に観測が進んでいる。McFadden *et al.* (1984) では可視 24 色のフィルターによるスペクトル観測の成果が、Bell *et al.* (1988) では近赤外域の 52 色のフィルターによるスペクトル観測の成果が報告されている。

1980 年代になると、CCD を用いたスペクトル観測が始まり、それらの最初の成果は Vilas and Smith(1985)にまとめられており、Luu and Jewitt (1990)にも多くの小惑星のスペクトル観測の結果が報告されている。1990 年代には Binzel らを中心にして、Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey (SMASS)というプロジェクトが進められ、その初期の成果は Xu *et al.* (1995)に、第 2 期の成果は Bus and Binzel(2002a)にまとめられている。特に近地球型小惑星については Binzel *et al.* (2004)にその成果がまとめられている。また SMASS の観測波長を近赤外域まで拡張した研究の成果は Burbine and Binzel (2002)にまとめられている。

SMASS 以外で体系的に進められているスペクトル観測には Small Solar System Objects Spectroscopic Survey (S³OS²)があり、Lazzaro *et al.* (2004)にその成果がまとめられている。

これまでの観測で約 2000 個の小惑星について可視域のスペクトルが取得され、約 200 個の小惑星について近赤外域のスペクトルが取得されたことになる。

1-4 小惑星の分類

1970年代に入ると、観測技術の進歩によって、多色測光以外にも、偏光観測や、熱赤外観測が進み、小惑星の反射率（アルベド）や大きさについての情報が数多く得られるようになる。初期の成果は Zellner *et al.* (1974) や Morrison (1974) にまとめられている。

これらの情報を総合して、小惑星の分類が試みられだすことになり、Chapman *et al.* (1971) では(B-V,U-B)が(0.83,0.4)のメジャーグループと(0.7,0.25)の小グループに分かれることを示している。また Zellner (1973) は、U-V 色指数、アルベドに相関があり、小惑星は大きく2つのグループに分けられることを示唆し、それぞれのグループに、初めて、“stony” と “carbonaceous” という呼び名を与えた。

Chapman *et al.* (1975) では、反射スペクトルの特徴と偏光度およびアルベドの情報から小惑星を C-type と S-type にわけその定義を示した。

Bowell *et al.* (1978) では、さらに定義を細かくし、Chapman *et al.* (1975) で U(unknown)-type とされていた小惑星の中から、E-type と M-type と R-type を定義した。

1980年代には ECAS で可視 8 色のフィルターを用いて 16 種類のグループを定義した (Tholen 1984)。

1990年代から始まった SMASS で 26 種類のグループを定義している (Bus and Binzel 2002b)。

Figure 1-4-1 に Tholen による分類の結果を、Figure 1-4-2 に Bus による分類の結果を示す。また代表的なスペクトル型について可視近赤外域の波長での反射スペクトルの形を Figure 1-4-3 に示す。

スペクトル型の分類は、大局的には、 $1\mu\text{m}$ 付近の吸収バンドの様子と、全体的なスペクトルの傾きから分類されている。広義の S 型は $1\mu\text{m}$ 付近の吸収バンドがはっきりしていて、スペクトルの傾きも右上がりの特徴をもつ。一方、広義の C 型は $1\mu\text{m}$ 付近の吸収がはっきりせず、スペクトルの比較的平坦な特徴をもつ。

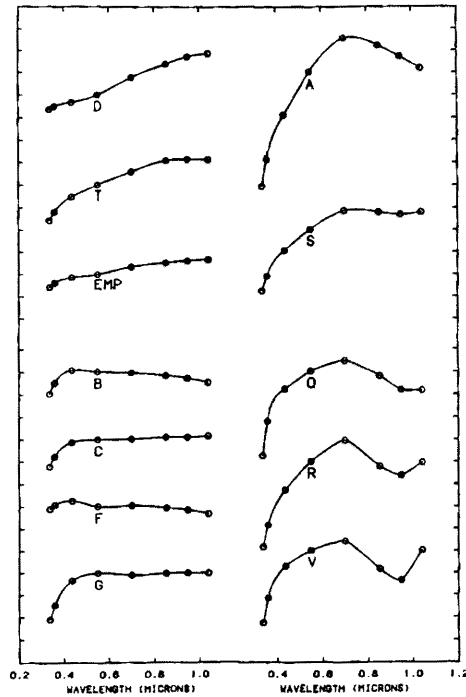


Figure 1-4-1 : Mean reflectance spectra for asteroid classes. Thick marks on the ordinate are spaced 0.2 magnitudes apart. (from Tholen *et al.* (1989), Fig.5)

Tholen による小惑星の分類 (Tholen *et al.* (1989) Fig.5 より)

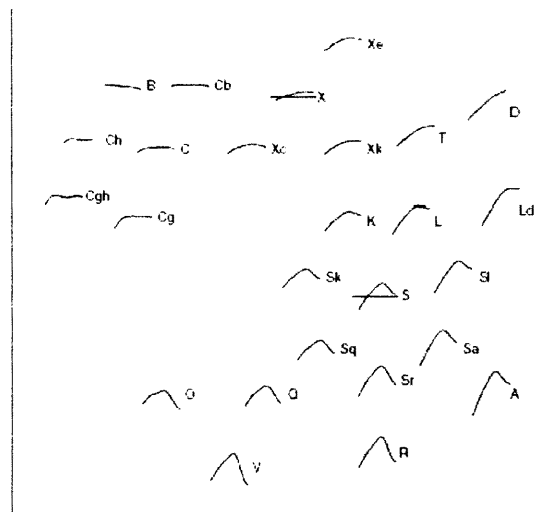


Figure 1-4-2 : Key showing all 26 SMASSII taxonomic classes. The average spectra are plotted with constant horizontal and vertical scaling and arranged in a way that approximates the relative position of each class in the primary spectral component plane. The horizontal lines to which each spectrum is referenced represents a normalized reflectance of 1.00. (from Bus and Binzel (2002b), Fig.15)

Bus による小惑星の分類 (Bus and Binzel (2002b) Fig.15 より)

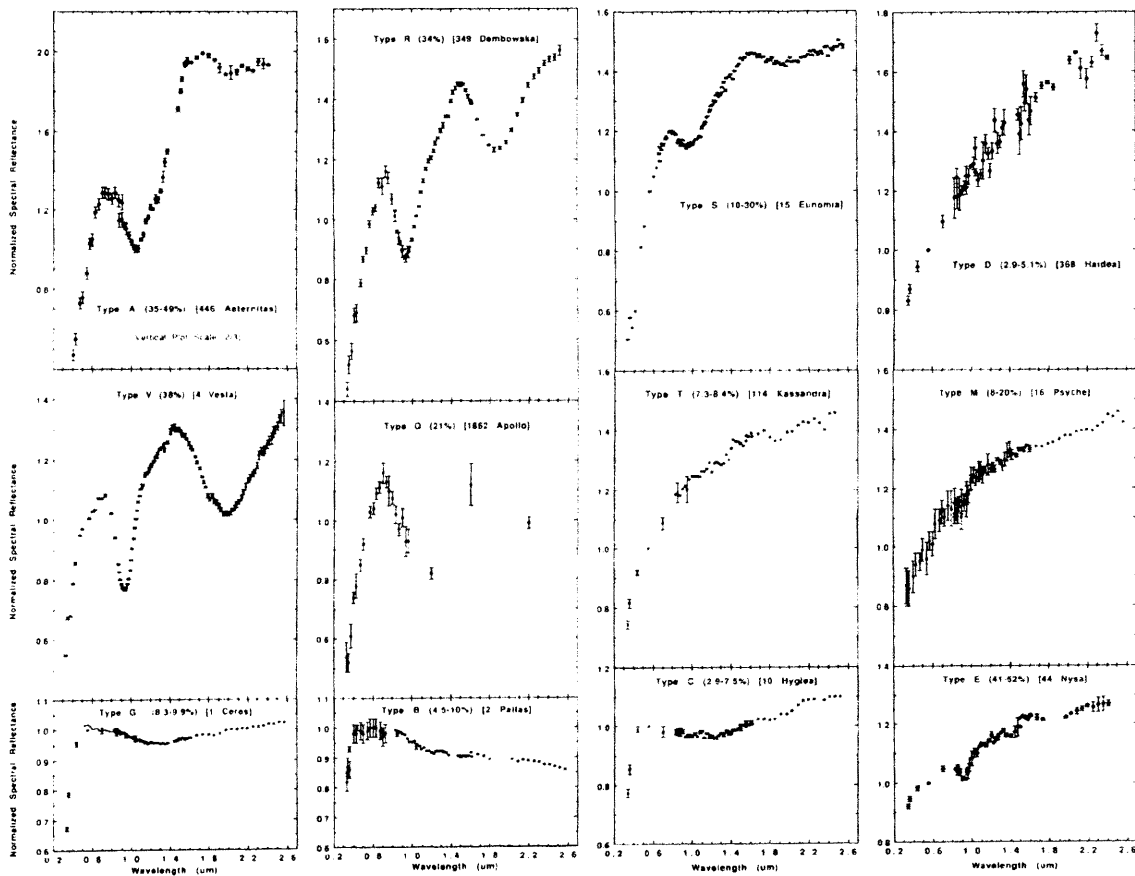


Figure 1-4-3 : Normalized reflectance spectra of representative members of asteroid taxonomic classes. Each example is labeled with the type, the albedo range for type in parentheses, and the name of the individual asteroid in square brackets. (from Gaffey *et al.* (1993b), Fig4)

代表的なスペクトル型の可視近赤外域波長における反射スペクトル (Gaffey *et al.* (1993b) Fig.4 より)

1-5 小惑星の分類と太陽からの距離およびサイズ依存性

小惑星分類が進むと、それらが小惑星のこういったパラメータと相関があるかの議論が始まるのは当然のことである。Chapman *et al.* (1975)では小惑星をS型とC型に分類すると同時に、2.2AU~3.2AUの範囲での両者の頻度分布について調査し、小惑星帯の内側にS型が多く、外側にC型が多いことを言及している。また Gradie and Tedesco (1982)では、調査の範囲を1.8AU~5.2AUに広げ、スペクトル型の分類もE,R,S,M,F,C,P,D型と増やして、それらの頻度分布の太陽からの距離依存性を明らかにした (Figure 1-5-1 参照)。その結果、小惑星帯の内側のハンガリア群(1.8AU付近)にはE,R型が、小惑星帯の外側のHilda群(4AU付近)にはP型が、さらに外側のトロヤ群(5.2AU付近)にはD型が多く、太陽からの距離に応じて頻度の高いスペクトル型が異なっていることを示した。

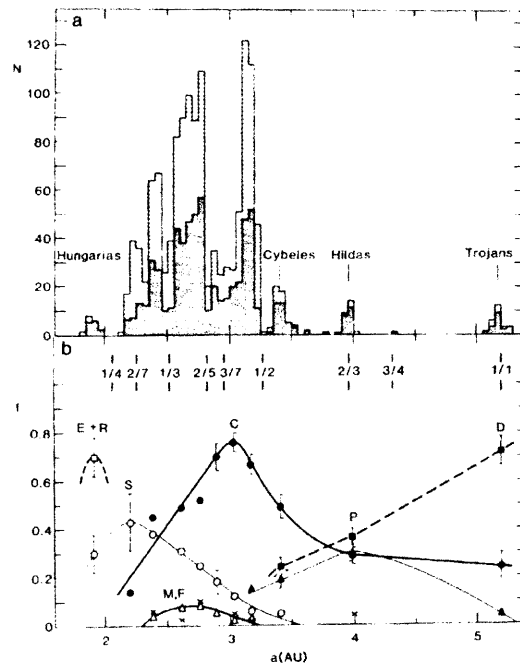


Figure 1-5-1 : (a) Number distribution in semimajor axis for the 1373 asteroids in bias-corrected sample. The darkly shaded portion is the fraction of sample (656 asteroids) for which taxonomic types exist. In the bias-correction technique it is assumed that population characteristics of the unobserved part of each zone are identical to those of the observed portion. Major resonances with Jupiter are indicated. (b) Observed relative type distribution of the bias corrected sample for types. Smooth curves are drawn through the data points of each type to more clearly delineate their distribution. (from Gradie *et al.* (1982), Fig.1)

太陽からの距離による小惑星の数の分布(a)とスペクトル型の頻度分布(b) (Gradie *et al.* (1982) Fig.1 より)

現在の太陽系で、小惑星のスペクトル型の頻度分布に太陽からの距離依存性が観察されることは、太陽系の起源と進化を考える上では非常に重要な事実であり、太陽系形成時に太陽からの距離に応じて、集積した小惑星の原材料物質が異なっていること、また形成された後、力学的な進化で軌道が変化する小惑星はあるものの、その分布がなくなるほど乱されてはいないという考えを支持するものである。小惑星のスペクトル型の太陽距離依存性については、*Gradie et al. (1989)*にもよくまとめられている。

小惑星のスペクトル型によるサイズ分布の違いについては、*Zellner (1979)* で言及がある。また *Gradie et al. (1989)*にもよくまとめられている。

小惑星のスペクトル型に太陽からの距離依存性や、サイズ依存性があることから、それを説明する太陽系の形成や進化のモデルを作ることができる(*Bell et al., 1989*)。

1-6 小惑星の表面物質の解釈と問題点

以上のように、小惑星はスペクトル型に分類され、それらの分布が太陽系の起源や進化に関する情報を持っていると考えられるため、それぞれのスペクトル型の構成物質を特定することは重要である。小惑星の表面物質については、その鉱物種を直接推定する場合と、類似する隕石タイプを推定する場合があるが、Zellner (1979)、Gaffey *et al.* (1989)、Bell *et al.* (1989)にはその両方がまとめられている (Table 1-6-1 参照)。また Gaffey *et al.* (1993a)にはS型小惑星をさらに細かく分類した場合の対応付けが提案されており、Burbine *et al.* (2003b)には隕石の母天体としての小惑星の対応付けについて最新の見解がまとめられている。

しかし、小惑星の表面物質の対応付けは、現在ではまだいくつかの問題点を持っている。Bell *et al.* (1989)には2つの大きな問題が示されている。1つ目はS型小惑星と普通コンドライトの問題。2つ目はA型小惑星の数の問題である。

Table 1-6-1 : Asteroid Classes: General Mineralogical Characterizations and Meteoritic Analogues (from Gaffey *et al.* (1989), Table III).

小惑星の分類と推定される表面物質および対応する隕石 (Gaffey *et al.* (1989) Table III より)

Type	No. ^a	Inferred Surface Mineralogy	Possible Meteoritic Analogues
A	4	olivine or olivine-metal	olivine achondrite or pallasite
B	6	hydrated silicates + carbon/organics/opaques	CI1-CM2 assemblages and assemblages produced by aqueous alteration and/or metamorphism of CI/CM precursor materials
C	88		
F	13		
G	5		
D	26	carbon/organic-rich silicates?	organic-rich cosmic dust grains? CI1-CM2 plus organics?
P	23		
E	8	enstatite or possibly other iron-free silicates	enstatite achondrites
M	21	metal (poss. trace silicates) metal + enstatite?	irons (poss. with silicate incl.) enstatite chondrite?
Q	1	olivine + pyroxene + metal	ordinary chondrites
R	1	pyroxene + olivine	pyroxene-olivine achondrite
S	144	metal ± olivine ± pyroxene	pallasites with accessory py. olivine-dominated stony-iron ureilites and primitive achondrites CV/CO chondrites
V	1	pyroxene ± feldspar	basaltic achondrites
T	4	possibly similar to types P/D	

^aThe number of asteroids classified as this type by Tholen (1984).

前者は Wetherill and Chapman (1988)でも述べられているように、古くから指摘されている問題で、小惑星帯の内側で最も多く存在する S 型小惑星の反射スペクトルと、地球に最も多く到達している隕石である普通コンドライトの反射スペクトルを比較すると、輝石やカンラン石、鉄が存在することでは一致するものの、それらの存在量が定量的には一致せず、スペクトルの傾きや吸収バンドの深さが大きく違うことで、鉄の存在量が S 型小惑星の方が多いように見えるという問題である。Bell *et al.* (1989)の対応付けでも、S 型小惑星は石鉄隕石に対応付けられており、普通コンドライトもスペクトル型としては非常に稀な Q 型小惑星に対応付けられており、それぞれの存在頻度に大きなギャップがある。

後者は Chapman (1986)によって指摘された問題で、コンドライト的な組成を持つ天体が分化をしていけば、体積的にはカンラン石を豊富に含むケイ酸塩鉱物の表面を持った小惑星がたくさん存在するはずであるにもかかわらず、カンラン石が表面物質と対応付けられている A 型小惑星の数が非常に少ないという問題である。

また、これら 2 つの問題以外にも、P,D 型小惑星に対応する隕石がまだ地球上では発見されていない(Gaffey *et al.*, 1993b)という問題もある。

これらの問題の原因は、小惑星の反射スペクトルの解釈に間違いがあるということ以外に、小惑星と隕石では見ているスケールが違うという問題もあり、これらの小惑星の直接的な探査が望まれている。

1-7 S型小惑星と普通コンドライトの関係

前述の、小惑星と隕石の関係におけるいくつかの問題点のうち、S型小惑星と普通コンドライトの関係については、近年研究が進んでいる分野である。

Wetherill and Chapman (1988)では問題点を解決させる可能性として、1)普通コンドライトはS型小惑星から来ているが、現在の普通コンドライトのサンプリングが十分でない、2)普通コンドライトはS型小惑星から来たが、S型小惑星の組成の解釈が間違っている、3)普通コンドライトはS型小惑星の分化を免れた部分のサンプルである、4)普通コンドライトはS型小惑星から来たのではなく、まだ良く分かっていない別の小惑星グループから来た、そのグループは非常に小さいためまだ見つかっていない、5)普通コンドライトはS型小惑星から来たのではなく、彗星起源のアポロ天体から来た、などをあげていた。

Binzel *et al.* (1996)は近地球型小惑星の分光観測から、S型小惑星と普通コンドライトの中間的な反射スペクトルをもつ小惑星を複数発見した (Figure 1-7-1 参照)。この発見の解釈として、表面物質の粒子サイズの違いや、鉱物種の違い以外に、宇宙風化作用の進行度の違いの可能性を指摘した。

宇宙風化作用とは、時間の経過に伴い、惑星表面物質が暗くなり赤味を帯びるとともに、光学的スペクトルの吸収帯の深さが変化することをさす言葉であり、月岩石と表土のスペクトルの間の違いを説明するために導入された概念である(Adams and McCord, 1971)。小惑星についての宇宙風化の言及は Pieters (1984)によってされている。

また、探査機による近接観測データも得られるようになった。ガリレオ探査機がS型小惑星 Gaspra と Ida をフライバイする際に観測したデータからは、小惑星の表面の反射スペクトルの場所による違いが発見された(Chapman, 1996)。ニア・シューメーカー探査機はS型小惑星 Eros にランデブーして観測を行い、表面のスペクトルの違いを検出した。Clark *et al.* (2001)は、この違いを宇宙風化の進行度の違いによるものと推定している。

一方、Moroz *et al.* (1996)および Yamada *et al.* (1999)は小惑星表面模擬サンプルにレーザーを照射することで、微小隕石の衝突や太陽風の照射を模擬したところ、反射スペクトルの赤化や吸収バンドの深さの浅化を示すことを発見し、宇宙風化を実験的に再現することに成功した。さらに Sasaki *et al.* (2001)はそのスペクトルの変化の原因として、カンラン石粒の周囲に、鉄ナノ微粒子が形成されていることを発見し、月の表土サンプルに見つかったものと類似したものができると明らかにした。これは、普通コンドライト的な表面を持つ小惑星が、宇宙風化によってスペクトルが変化する (Pieters *et al.*, 2000)を支持するものである。

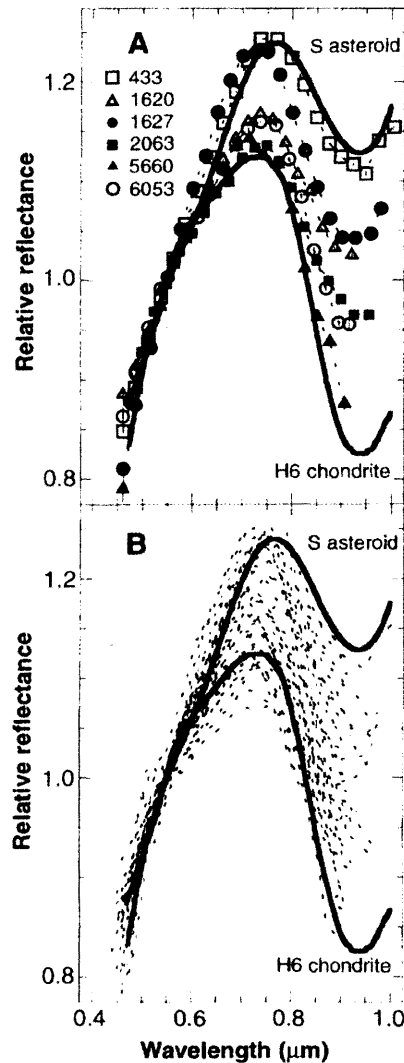


Figure 1-7-1 : Visible-wavelength reflection spectra for near-Earth asteroids spanning the gulf separating the spectra of S asteroids (upper solid line) from OC meteorites (lower solid line). (A) Spectra for six asteroids are presented to show the range of variations for individual objects. (B) Spectra for 35 near-Earth asteroids are indicated by dashed lines only. In both (A) and (B), all spectra are normalized to unity at $0.55 \mu\text{m}$ but are not offset. The S-asteroid spectrum represents an average from main-belt S asteroids, and the meteorite spectrum is an average for H6 chondrites. (from Binzel *et al.* (1996), Fig.3)

近地球型小惑星の反射スペクトルと S 型小惑星の平均スペクトル（上の実線）および普通コンドライト（下の実線）との比較。(A)は 6 つの代表的な小惑星のスペクトル。(B)は 35 個の近地球型小惑星のスペクトル（破線で表示）。(Binzel *et al.* (1996), Fig.3 より)

さらに Binzel *et al.* (2004)は近地球型小惑星の宇宙風化の進行度は大きさが 0.1 km~5 km の範囲で変化しており、小さい小惑星ほど、宇宙風化が進んでいないことを観測データから明らかにした。

また Jedicke *et al.* (2004)および Nesvorný *et al.* (2005)は S 型小惑星の表面年代と宇宙風化の進行度の関係を観測データから示すことに成功している。Strazzulla *et al.* (2005)は太陽風照射を模擬したイオン照射においても宇宙風化を再現することに成功している。

このように、現在では S 型小惑星と普通コンドライトの問題は Wetherill and Chapman (1988)で示された 5 つの可能性のうち、2)と考えるのが有力である。しかし、すべての S 型が普通コンドライト的な表面が宇宙風化を受けたものとして説明できるわけではなく、Gaffey *et al.* (1993a)では S 型はさらに細かく分類されており、Gaffey *et al.* (1993b)で対応付けられているように、一部は石鉄隕石や始原的エイコンドライトと関係するものも含まれていると考える研究者も多い。

1-8 サンプルリターン探査の必要性

以上のように、小惑星の物質に関する研究は地上観測データのうち、特にスペクトル観測のデータを用いて研究が進み、また隕石との関連もある程度推定され、地上の実験室で詳細に分析されている隕石のデータと合わせて、太陽系の起源や進化について考えることができるようになってきた。しかし、隕石はその出身天体（母天体）が確実になっているものではなく、直接探査で小惑星の表面物質を地球に持ち帰るサンプルリターン探査を行うことで、その分析結果を通して、小惑星と隕石の対応付けを決着させていくことが必要である。

またこれまでの探査機による直接探査によるスペクトルデータも、空間分解能が最高で 500 m 程度であり、実際に地球で隕石として観測しているスケールに比べるとまだ大きなギャップがあり、より高い空間分解能の観測データが望まれる。

はやぶさミッションは、そのような背景のもとで計画された、世界で初めての小惑星サンプルリターンミッションである(Kawaguchi *et al.*, 2003; Fujiwara *et al.*, 2004)。

はやぶさミッションの探査対象天体については、計画段階で何度か変更があったが、最終的には S 型小惑星のイトカワになった。この小惑星は 1998 年に LENEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research)プログラムの中で発見された小惑星である(Tichy *et al.*, 1998)。小惑星イトカワについては筆者らを中心として地上観測キャンペーンが実施され、さまざまな観測データを得ることができている。地上観測データのまとめについては、Appendix 1 として、本文の最後に添付する。

1-9 本論文の構成

本論文は研究の背景を述べた本章をはじめとして全6章で構成される。

第2章では、本研究で設計・開発した近赤外線分光器の概要と性能について述べる。第3章では、開発した分光器が搭載された小惑星探査機はやぶさの打ち上げ後小惑星に到着までに実施された運用と得られた結果についてまとめる。第4章では、小惑星到着後に小惑星近傍で行った運用についてまとめ、第5章では、得られた小惑星イトカワの反射スペクトルに関する成果についてまとめる。第6章では、各章のまとめと全体的な議論を行う。

第2章 近赤外線分光器の開発

2-1 はやぶさミッション

小惑星探査計画はやぶさは 1996 年に MUSES-C 計画として正式にスタートした工学試験衛星である。工学的な要素として、イオンエンジンによる惑星間航行、低推力推進と地球スイングバイの併用による軌道制御、自律機能による航法誘導、微小重力下での試料採取、カプセルによる試料回収などの技術実証が主な目的であるが(Kawaguchi *et al.*, 2003)、理学的にも、S 型小惑星イトカワの近傍での科学観測と小惑星表面からのサンプルリターンという大きな目的を持っている(Fujiwara *et al.*, 2004)。

はやぶさ探査機は 2003 年 5 月 19 日に打ち上げられ、2005 年 9 月 12 日に小惑星イトカワに到着、11 月まで科学観測を実施した後に、サンプリングのための着陸・離陸を実施、2010 年の地球帰還を目指して現在運用中である。

本論文の著者は、このはやぶさ探査機に搭載された、近赤外線分光器の Principal Investigator を担当し、その設計開発の段階から観測運用の段階まで 10 年以上にわたって関わってきた(安部他, 1997)。次節よりその近赤外線分光器について解説する。

2-2 はやぶさ搭載近赤外線分光器の目的

本分光器は小惑星表面を 764 nm~2100 nm の波長域（近赤外域）で観測することを目標に設計された(安部 藤原, 1998; Abe *et al.*, 1999)。この波長域は太陽光の散乱が主である領域で小惑星の反射スペクトルの観測が行える。前章でも述べたように、近赤外域の反射スペクトルは鉱物種の情報を含んでおり、小惑星表面物質の推定を行うことが可能である。この波長域には隕石の主要鉱物である輝石やカンラン石の吸収バンドがあり、小惑星表面にもこれらの吸収が観測されると考えられる。これらの吸収バンドは地上観測によっても検出できる可能性があるが、本分光器では探査機による近接観測の特徴を生かして小惑星表面を空間分解して観測し、表面物質分布の非一様性を調べることを第一の目標とする。特に今回の観測対象であるイトカワのような直径 1 km 弱の小さな小惑星に表面物質分布の非一様性の有無が観測されれば、その原因の考察を通して小惑星の形成と進化について議論をすることが可能になる。小惑星表面の空間分布は、分光器の視線方向を小惑星表面に対して変化させることにより行う。

この他にも、観測波長域全体のスペクトルの傾きの傾向や反射スペクトルの絶対強度の場所による違い（クレータの中と外、太陽位相角による変化など）を調べることにより、小惑星の表面状態（宇宙風化作用の進行度や粒子サイズなど）に関する情報が得られると考えられる。

本分光器で得られる近赤外スペクトルに、可視カメラ（AMICA）の多色フィルターによる観測情報を合わせれば、小惑星表面の可視近赤連続スペクトルを作ることができ、小惑星表面存在鉱物の推定はより確かなものになる。また蛍光 X 線スペクトロメータ（XRS）による表面元素組成のデータもあわせることで得られるグローバルな小惑星表面物質の情報は、サンプリングおよびその後の分析で得られるローカルな表面物質の情報と相補的であるだけでなく、小惑星全体の構成物質の推定をする上でもっとも重要であり、隕石との関係や小惑星の形成と進化を議論する上で必要不可欠な情報を与えるものと考えられる。

目標とする波長分解能と S/N であるが、1 μ m 帯にある輝石やカンラン石の吸収バンドを捕らえ、輝石・カンラン石の存在比の議論が可能になるように、波長分解能を $\lambda/\Delta\lambda=40$ 程度、S/N=100 程度とする。波長分解能 $\lambda/\Delta\lambda=40$ は 1 μ m 帯で 25 nm に相当する。カンラン石や輝石の吸収バンドは半値幅が 200 nm 程度はあるので (Figure 2-2-1 および Figure 2-2-2 参照)、波長分解能が 25 nm 程度あれば、吸収バンドの有無だけでなく、中心波長の議論も十分行える。S/N については、S 型小惑星のような 1 μ m 帯の吸収バンドをもつ小惑星の吸収深さは 10% 程度の反射率の変化を伴って現れるため (Figure 1-4-3 参照)、S/N が 100 程度あれば、吸収バンドの有無だけでなく、吸収バンドの深さの定量的な議論も十分行える。

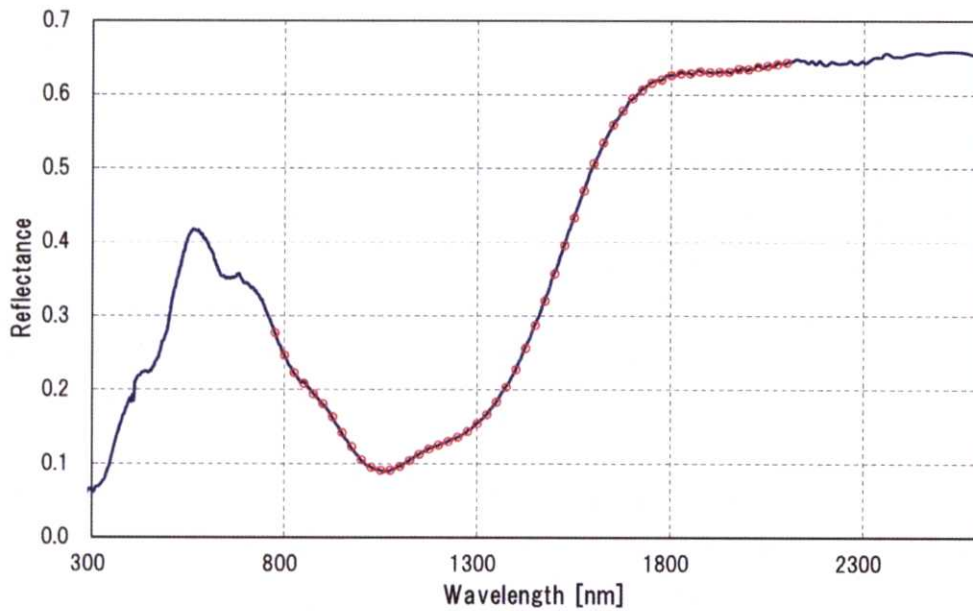


Figure 2-2-1 : Reflectance spectrum of olivine (blue line) and the data point of this spectrometer (red circle) (Data is olivine GDS70 from Clark *et al.* (1993)).

カンラン石のスペクトル(青線)と本分光器で想定する観測波長範囲と波長分解能でデータを取得した場合の点(赤丸) (スペクトルデータは Clark *et al.* (1993)の olivine GDS70)

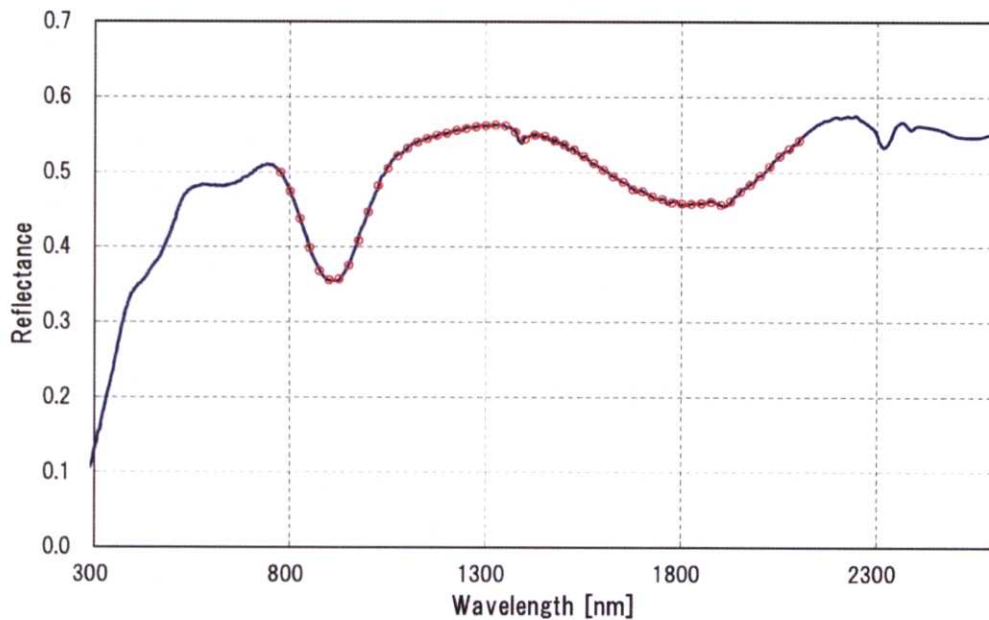


Figure 2-2-2 : Reflectance spectrum of enstatite (blue line) and the data point of this spectrometer (red circle) (Data is enstatite NMNH128288 from Clark *et al.* (1993)).

輝石のスペクトル(青線)と本分光器で想定する観測波長範囲と波長分解能でデータを取得した場合の点(赤丸) (スペクトルデータは Clark *et al.* (1993)の enstatite NMNH128288)

2-3 本分光器の概要

本分光器では、太陽を光源とした小惑星表面での散乱（反射）光を望遠鏡で集光し、波長分散素子を用いて分光した後に、多チャンネル赤外線検出素子によって 764 nm~2100 nm の近赤外線スペクトルを測定する(安部他, 2000; Abe *et al.*, 2000)。また望遠鏡の視線方向を探査機の姿勢の変化や小惑星の自転による走査によって変化させて空間情報を得る。

本分光器は検出器に InGaAs 半導体素子（1次元イメージセンサ）を採用している。本来赤外線観測は装置を冷却するために非常に大きな重量を要するが、InGaAs 半導体素子は電子冷却で達成できる冷却温度で十分な感度を持つため、冷却機構に要する重量を軽減することができる。

光学系は、集光系およびコリメータ系には反射鏡を用いているが、波長分散素子および焦点面付近の光学系には透過型光学系を使用した。この方式を採用することにより、明るくかつコンパクトな光学系を実現することができ、装置の軽量化に結びついている。

分光手段に透過型グレーティングであるグリズムを用いたことにより、本来は観測波長域が 1 オクターブ以内に制約される。本分光器ではクロスディスペルザーをグリズムと一体加工で組み込むことにより、1次光と2次光を波長分散方向と垂直な方向に分離させる工夫を行った。これにより1つの検出器で1オクターブ以上の観測波長域を実現させている。

本分光器の光学系で集光する赤外線のシグナルは検出器で生じる暗電流と同等あるいはそれ以下の大きさである。しかし、シャッターを利用したチョッピングを行い、暗電流を取り除くことで観測の S/N を十分な大きさにすることが可能である。

また航行中の性能の変化などをモニターし機上較正を行うためのキャリブレーションランプを2種類搭載し、波長較正と感度較正が実施できる。

本分光器は Near Infrared Spectrometer の頭文字をとって、NIRS とよばれ、探査機のコンポーネント名称にもこの略称を用いている。

本分光器はセンサ部にあたる NIRS-S と、エレキ部にあたる NIRS-E に大きく分けられる。NIRS-S は-Y パネル内部に取り付けられ、-Z パネルにあけられた穴を通して、-Z 方向を観測する。-Z パネルにはシステムフードが探査機内部向きに取り付けられ、本分光器のフードと接続することにより、探査機下面以外からの光が分光器内部に入光するのを防いでいる。NIRS-E は+Y パネル内部に取り付けられる NIX-E の筐体内に搭載される。NIX-E には CPU ボードである OBC および電源ユニットである PSU があり、これらを XRS と共用する。

Figure 2-3-1、Figure 2-3-2 に探査機の概観図と本分光器の取り付け位置を示す。

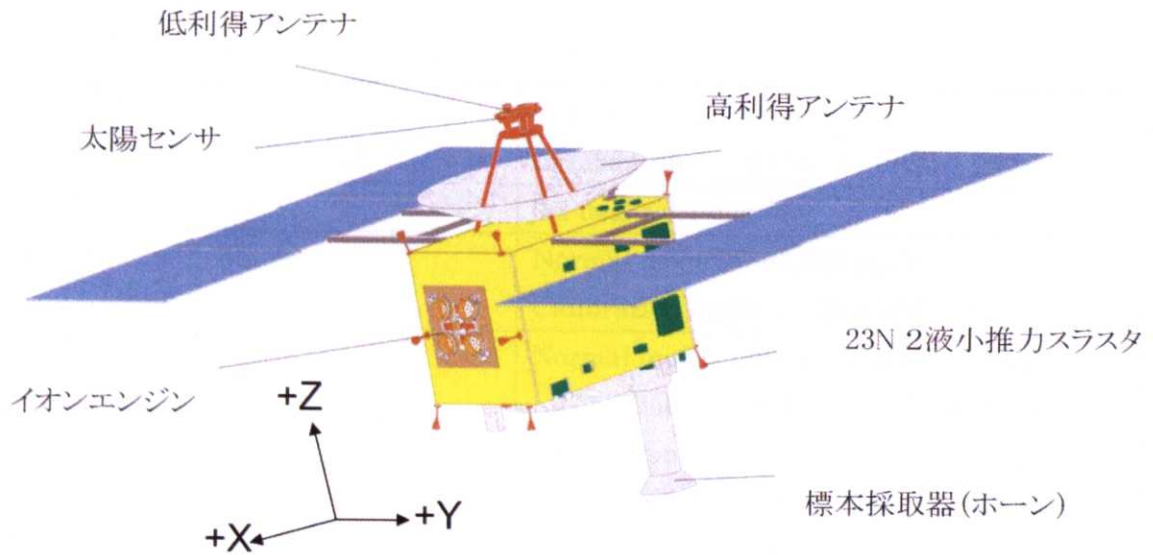


Figure 2-3-1 : Side view of Spacecraft.
 探査機の概観図(側面から)。矢印は探査機座標系。

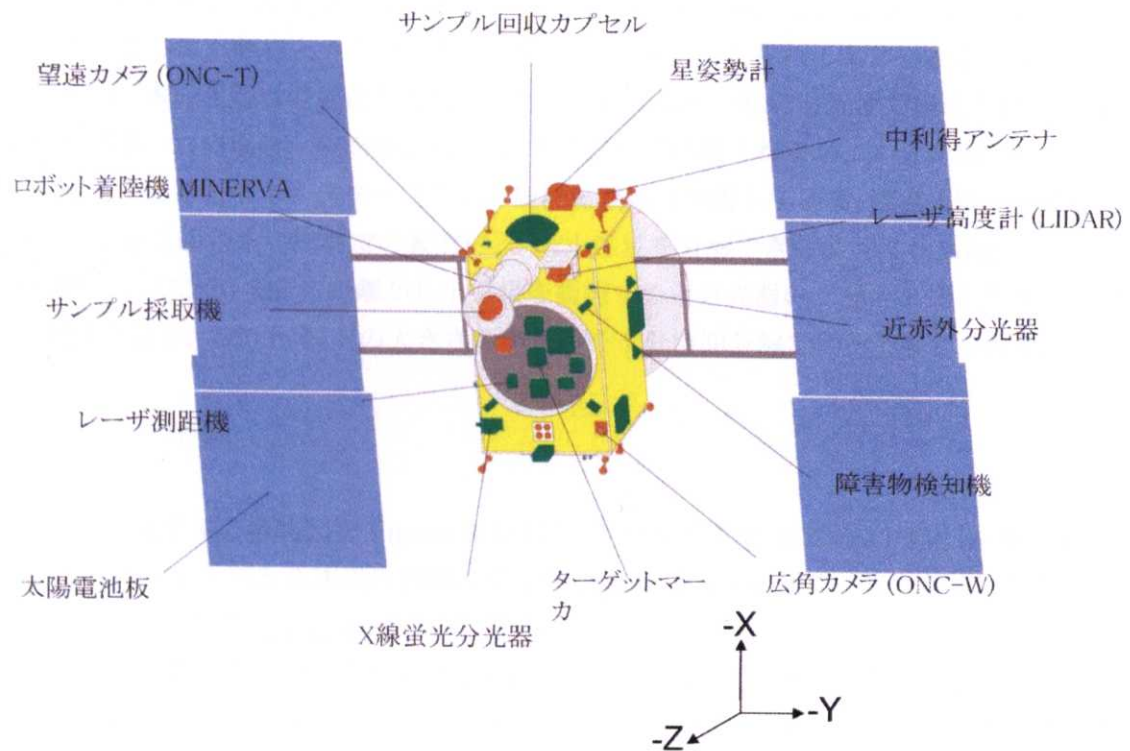


Figure 2-3-2 : Bottom view of Spacecraft.
 探査機の概観図(下面から)。矢印は探査機座標系。近赤外線分光器は探査機下面の-Yパネル付近の穴から観測を行う。視線方向は-Z方向。

Table 2-3-1 : Specification of NIRS.

NIRS の全体性能仕様

観測波長範囲	764 nm ~ 2100 nm
波長分解能と波長ピクセル関係式[1-64]	$\text{Lambda}(\text{nm}) = -23.56 \times \text{Pixel} + 2271.44$
観測視野	0.1 deg.×0.1 deg.* ¹
撮像周期	Normal mode* ² : 65.536 msec Calibration mode* ³ : 積分時間 + 7.996 msec
積分時間	Normal mode : $n(8\text{bit}) \times 256 \mu\text{s} + 256 \mu\text{s}$ 最小=256 μsec (00h), 最大=57.344 msec(dfh) Calibration mode : $n(8\text{bit}) \times 256 \mu\text{s} + 260 \mu\text{s}$ 最小=260 μsec (00h), 最大=65.54 msec(ffh)
シャッター駆動	7.63 Hz (131.072 msec)

※ 1 : スリット・サイズ: 71.5(W)×70.9(H) μm 、四隅の R の平均値; $6.075 \pm 0.457 \mu\text{m}$

※ 2 : 積分時間に関わらず、65.536 msec 間隔でデータを取得するモード。

※ 3 : データ転送後、すぐに次のデータを取得 (積分時間+7.996 msec 間隔) するモード。

NIRS-S の全体性能仕様を Table 2-3-1 に示す。観測波長域および波長分解能は第 2-2 節でも述べたように、輝石とカンラン石の吸収バンドを捕らえられるように設定している。後述するが、本分光器は軽量化を実現するために検出器が一つの分光器で構成されている。通常検出器が一つの場合、観測波長域は 1 オクターブに限られるが、本分光器では、分散素子を工夫することで 1 オクターブ以上の観測波長域を実現している。観測視野サイズは、小惑星から 10 km 程度の距離での観測で、十分小惑星を分解できるように 0.1 deg とした。この視野サイズで 10 km の距離から小惑星を観測すると分光器のフットプリントサイズは 17 m 程度となり、500 m 程度の大きさの小惑星を十分空間分解できると考えられる。

2-3-1 光学系

NIRS-S の光学系の概略図を Figure 2-3-3 に、光路図を Figure 2-3-4、Figure 2-3-5 に、焦点面における 1 次光と 2 次光の分離の様子を Figure 2-3-6 に示す。また焦点面におけるスポット径の温度特性を Figure 2-3-7 に示す。

NIRS の光学系は屈折光学系と反射光学系をトレードオフした結果、カメラレンズ系に屈折光学系を採用し、集光系に反射光学系を採用した。前者は小型で明るい光学系を構成するのに有効であった。後者はスリットへのアライメント調整を可視光で行える利点と、光学系を折りたたむことで、光学ベンチの裏側に収納する回路基板の縦横比を 1 に近くすることができ、電子部品の配置を考える上で利点となる。

第 1 反射鏡と第 2 反射鏡は放物鏡で、焦点の位置にあるスリットによって視野サイズが

決定される。スリット位置にシャッターを配置することで、明信号と暗信号が短い時間間隔で取得できる。このシャッターによって、検出器の暗出力を精度良く推定して差し引くことができ、S/Nの向上に貢献している。シャッターは可動部品であり、宇宙使用には不向きな部品であるが、今回はねじり軸受け (Flexural Pivot) を採用することで、摺動部分をなくした。シャッターの開発は株式会社東芝の生産技術研究所によって行われたものを採用した。

採用した検出器の波長分散方向のピッチが $50\ \mu\text{m}$ であることから、 $50\ \mu\text{m}$ に対応するナイキスト周波数に対する MTF (Modulation Transfer Function) が 75% 以上になるように、光学系を設計しており、 $-20^\circ\text{C}\sim+20^\circ\text{C}$ の設計温度範囲 (性能維持温度範囲) で、観測波長全域において、この値以上になっていることを確認した。

波長分散素子には透過型グレーティングであるグリズムを採用した。グリズムのブレード波長は、検出器の感度特性と小惑星からのフラックスを予測して、観測波長範囲の全域で高い S/N になるように選定した。なお、観測波長範囲を 1 オクターブ以上にするためには、検出器上で 1 次光と 2 次光を分ける必要があり、波長分散方向と垂直な方向にプリズムを配置することで実現させた。グリズムとプリズムは一体加工である。

カメラレンズは 5 群 5 枚で構成され、使用硝材はアッベ数の大きい CaF_2 と屈折率の大きい硝材の組み合わせ (具体的には OHARA 社の PBH1 と TIH53) を採用した。 CaF_2 は宇宙使用実績がある硝材であったが、それ以外は未実績のものであったため、硝材の対放射線性能試験を実施した。 $-Y$ パネル内面に取り付けられる機器の放射線環境は $10^4\ \text{rad}$ 程度と見積もられており、 $10^5\ \text{rad}$ のガンマ線照射実験を実施し、透過率の変化を測定した。照射実験は東大原子力センターの ^{137}Cs を線源とするガンマ線照射装置を用いた。Figure 2-3-8、Figure 2-3-9 に PBH1 および TIH53 の照射実験結果を示す。TIH53 については、 $10^5\ \text{rad}$ の照射でも本分光器の観測波長範囲内での透過率の低下は 2% 以内で問題ないが、PBH1 については $10^4\ \text{rad}$ で短波長側で 10% 程度の透過率の低下が見られる。この原因については、硝材の化学組成についての詳細な情報が開示されていないため正しいことは不明であるが、硝材の名前のおり PBH1 には鉛が含まれていることが原因であると考えている。実際 TIH53 に近い光学特性をもつ PBH53 の照射実験も行ったが、PBH1 と同様な透過率の変化を示した。そこで、PBH1 と同等な光学特性をもつ TIH1 を光学系に組み込んだ場合の検討を行ったが、長波長側での屈折率の違いが大きいため、スポット径の温度変化が大きかった。一方、PBH1 については、 $10^5\ \text{rad}$ 照射後の透過率の経年変化をモニタしたところ、Figure 2-3-10 に示すように、照射後 1 ヶ月程度で透過率の低下は NIRS の観測波長範囲では半分程度まで回復した。今回の実験はガンマ線を短時間で照射しているが、実際は数年という長いタイムスケールで徐々に照射を受けるので、Figure 2-3-10 に示されるような回復力を考慮すると実際には PBH1 を用いても NIRS の観測波長範囲での透過率の低下は数%程度以下になると予想され、本分光器の使用に問題ないと判断した。

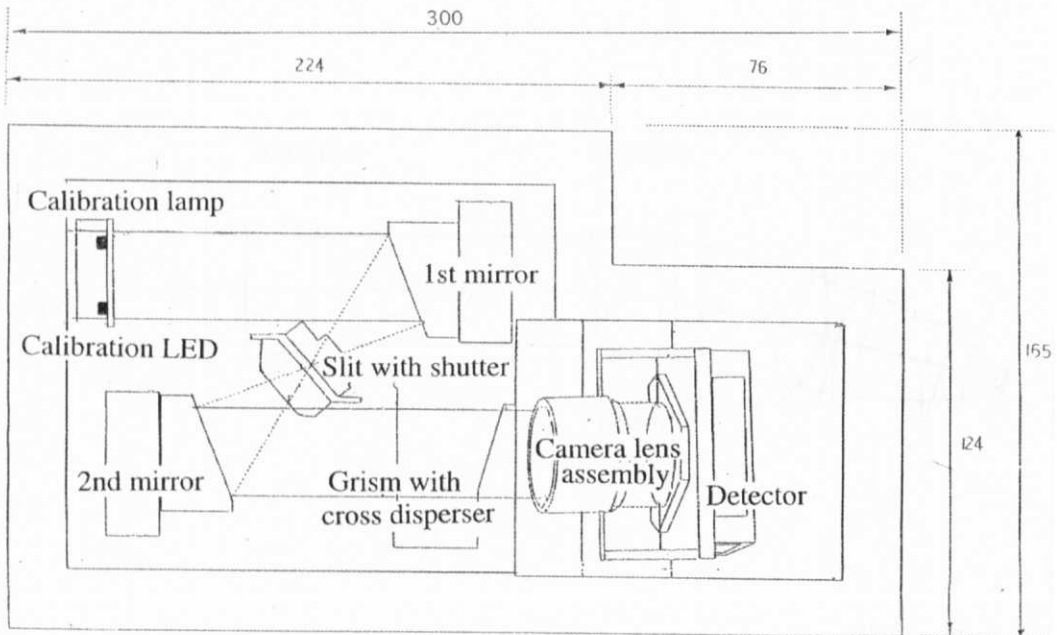


Figure 2-3-3: Overview of NIRS-S.
NIRS-S 概略図

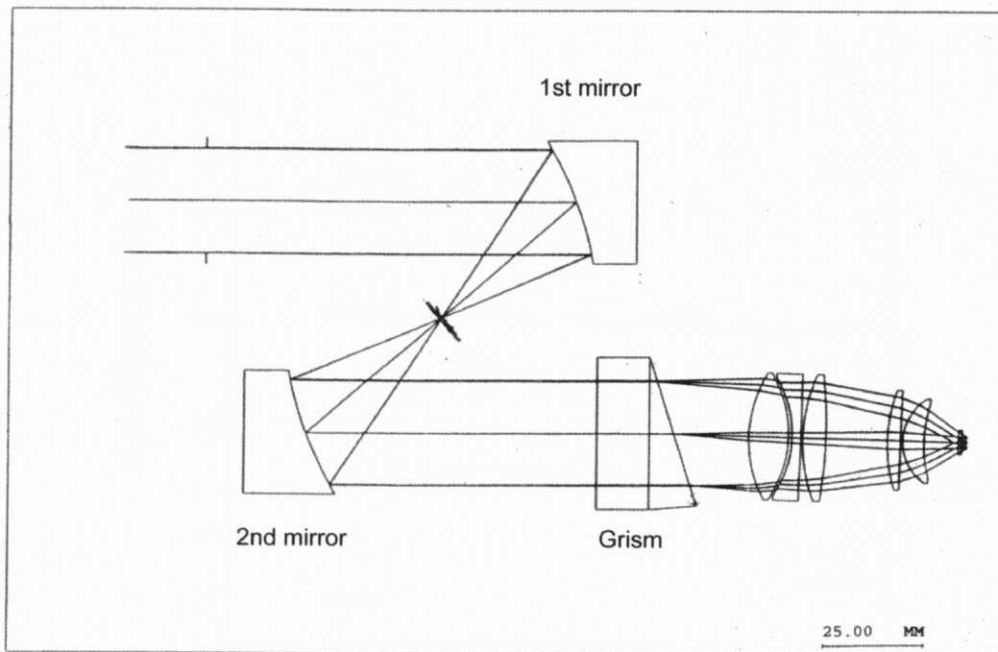


Figure 2-3-4: Optical configuration of NIRS-S.
NIRS-S の光路図 (波長分散方向)

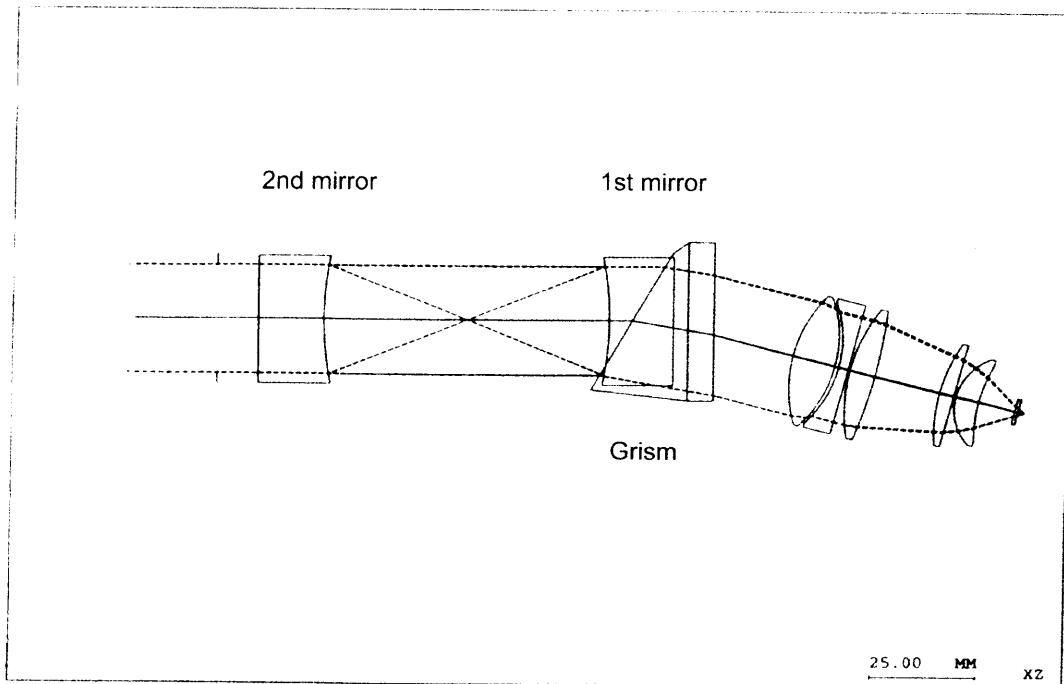


Figure 2-3-5: Optical configuration of NIRS-S.
NIRS-S の光路図 (波長分散直角方向)

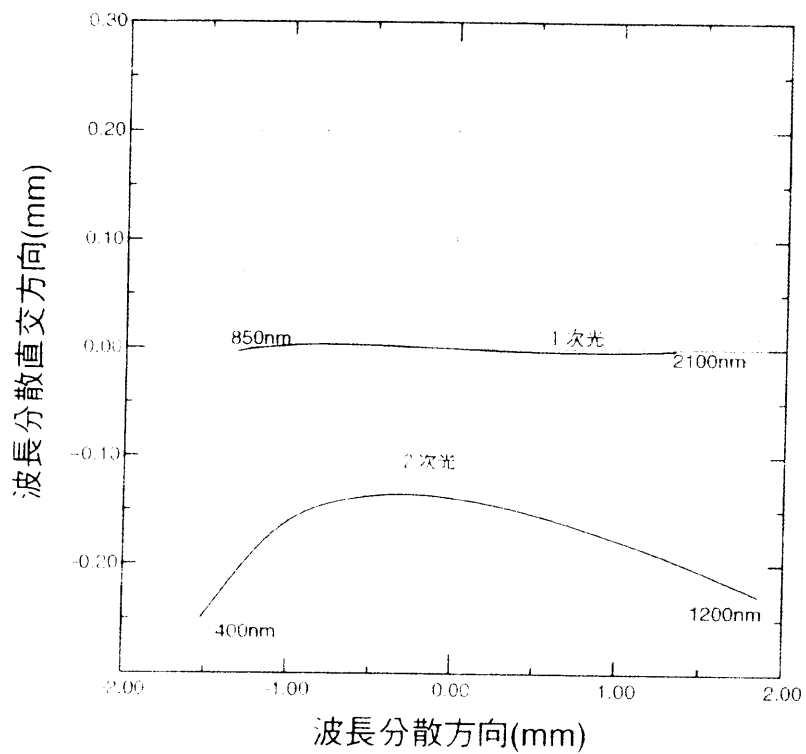


Figure 2-3-6: Focal plane of NIRS-S.
焦点面における 1次光と 2次光の分離の様子

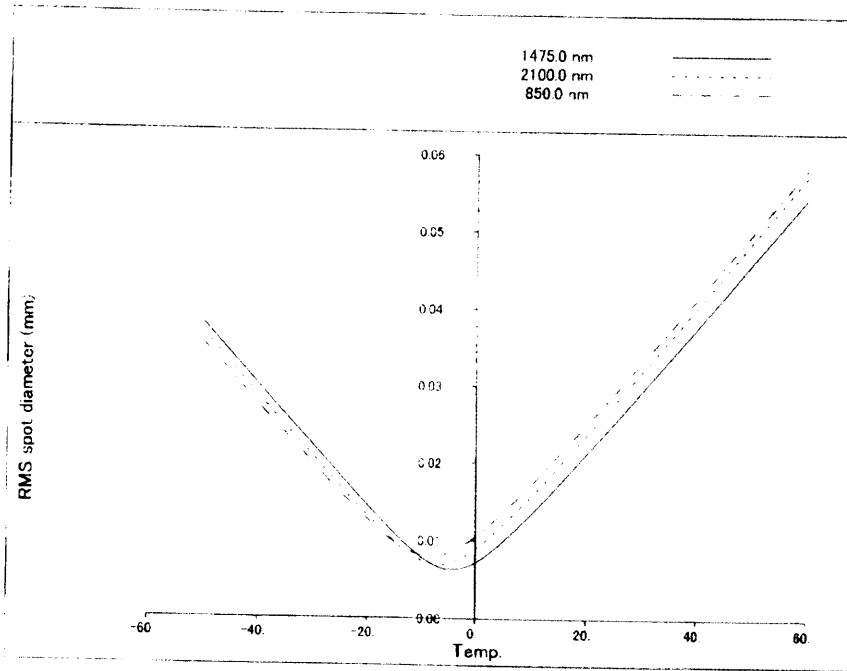


Figure 2-3-7: Spot size.
スポット径の温度特性

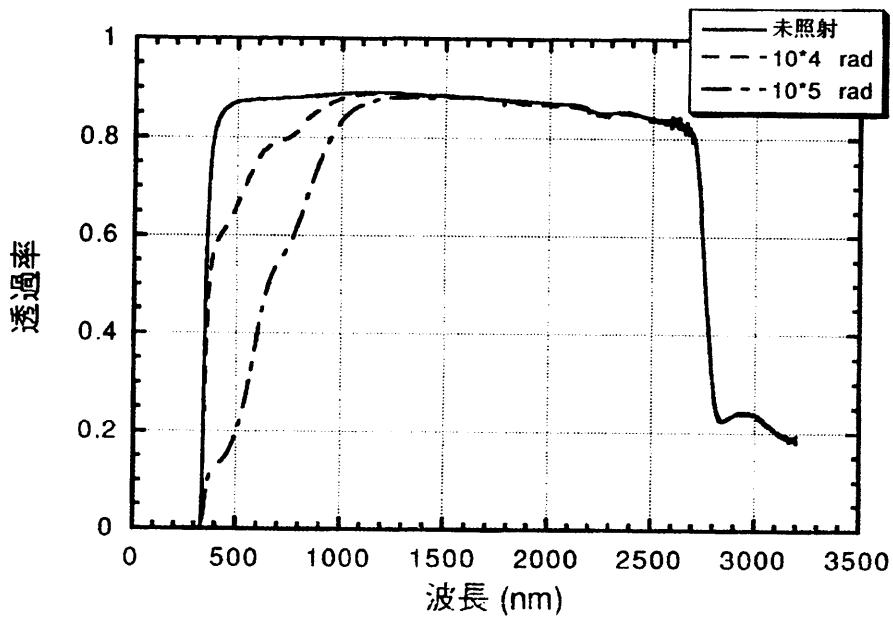


Figure 2-3-8: Transmissivity measurement result of PBH1. 0 krad (solid line), 10 krad (broken line), 100 krad (chain line).

PBH1 の透過率測定結果 (未照射(実線)、10krad 照射(破線)、100krad 照射(一点鎖線))

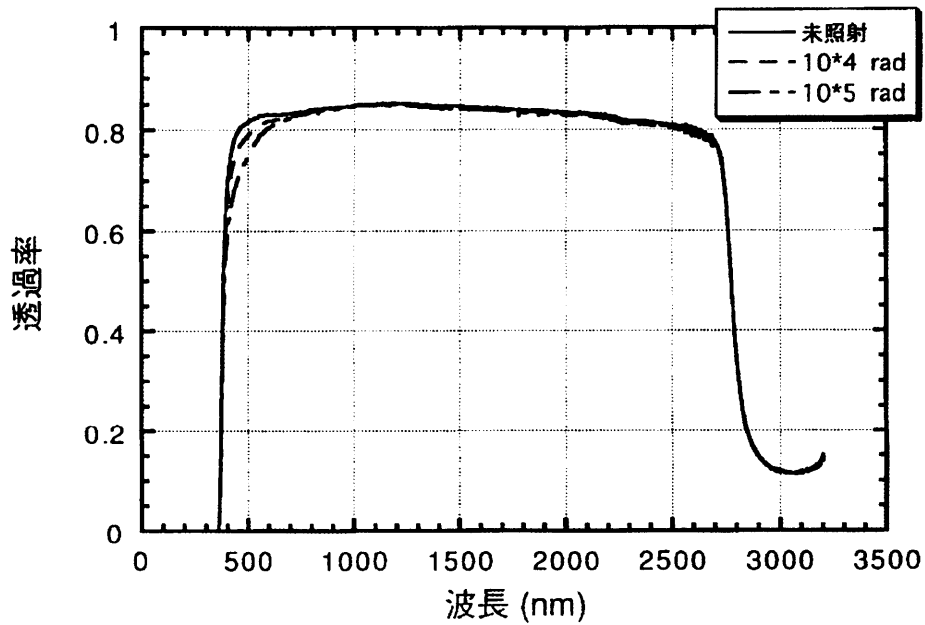


Figure 2-3-9: Transmissivity measurement result of TIH53. 0 krad (solid line), 10 krad (broken line), 100 krad (chain line).

TIH53 の透過率測定結果 (未照射(実線)、10krad 照射(破線)、100krad 照射(一点鎖線))

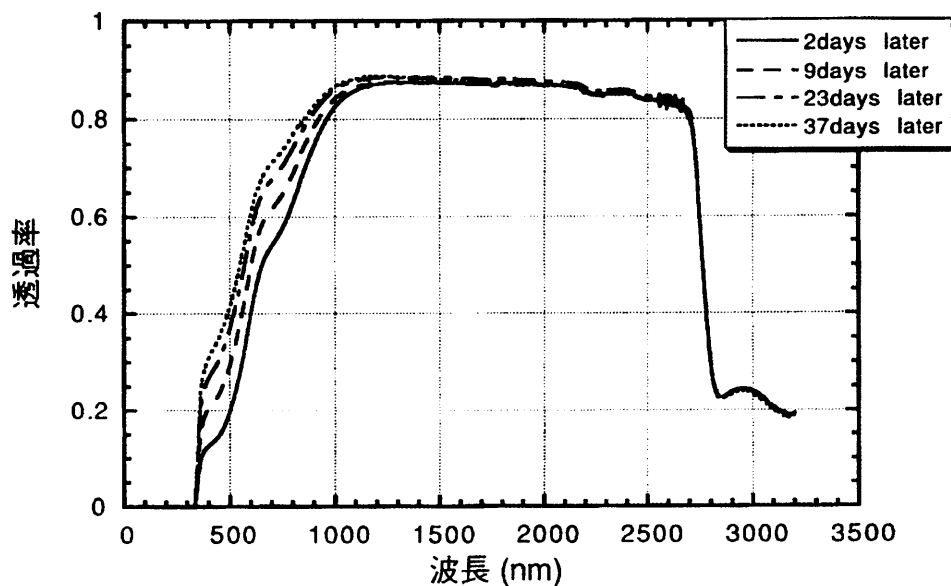


Figure 2-3-10: Transmissivity measurement result of PBH1. 2 days (solid line), 9 days (broken line), 23 days (chain line) 37 days (dotted line) after 100 krad irradiation.

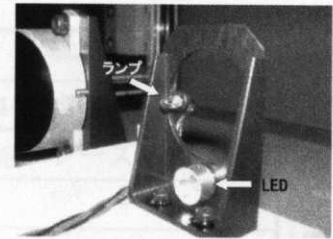
PBH1 の透過率の時間変化。100 krad 照射後 2 日 (実線)、9 日後 (破線)、23 日後 (一点鎖線)、37 日後 (点線)。

Table 2-3-2: Specification of optics.

光学系の性能緒言

有効口径 ^{*1}	φ 27.2 mm
対物鏡 F 値	1.47
総合 F 値	1.0
総合効率 ^{*2}	別図参照
検出器上のスポット径	-20℃～+20℃の範囲でφ 30 μm 以下
2 次光の分離機構	グリズムと一体加工したクロスディスパーザー

※ 1: 開口絞りに CAL 用の LED を固定するため、蹴られが生じる。
φ 27.2 mm の面積を 1 とした場合、有効面積は 0.96 となる。
LED は第 1 反射鏡から見ると視野の外(下側)に位置する(右図)。
CAL 用のランプは視野の左側に位置する(右図)。



※ 2: グリズム単体の効率とリニアイメージセンサー単体および NIRS の総合効率(感度特性)をそれぞれ Figure 2-3-11、Figure 2-3-17、Figure 2-8-11 に示す。

NIRS-S の光学系の性能諸言を Table 2-3-2 に示す。

グリズムの効率測定は、モノクロメータとサーモパイル、チョッパーを用い、ロックインアンプを介してデータを取得した。Table 2-3-3 にグリズムの性能緒言を表し、Figure 2-3-11 と Figure 2-3-12 にグリズムの回折効率および回折角の測定結果を示す。

グリズムにおいて 1 次光の回折強度が最も強くなる波長をブレイズ波長と呼び、 λ_B とすると、

$$\lambda_B = d(n_1 \sin \alpha - \sin(\beta - \sin^{-1}(n_2 \sin(\beta - \sin^{-1}(n_1/n_2 \sin \alpha))))).$$

と表される。ここで d は格子幅、 α はプリズム角度 (分散方向)、 β はグループ角 (今回の設計ではプリズム角と同じにしている) で、 n_1 は硝材の屈折率、 n_2 は樹脂材の屈折率である。

また、プリズム面からの射出角を回折角 θ_{out} とすると、入射角を 0 度とした場合、

$$\theta_{out} = \sin^{-1}(n_1 \sin \alpha - m\lambda/d).$$

で表される。ここで m は回折光の次数、 λ は入射光の波長である。

また、回折効率 I はブレイズ波長をピークとして、 $I = (\sin X/X)^2$ の形で変化することが知られており、 X は

$$X = \pi (\lambda^{-1} - (\lambda_B/m)^{-1}) / \lambda_B^{-1}$$

である。

Figure 2-3-11、Figure 2-3-12 より、実測した効率と回折角は上記の理論計算から求めた値（工藤 1985 など参照）とほぼ一致していることがわかる。理論式からのずれは、理論式には屈折率の波長依存性を入れていないことが主な原因であると考えられる。今回製作したグリズムのブレイズ波長 1180.9 nm における効率は、85.0% を達成した。

Table 2-3-3: Specification of Grism.

グリズムの性能緒言

使用波長領域	750 nm ~ 2100 nm
硝材	ED-B(石英)、屈折率 n=1.445@ブレイズ波長
樹脂材	UV-Resin、屈折率 n=1.51@ブレイズ波長
ブレイズ波長	1181 nm
ピーク効率	85%
有効径	φ33 以上
プリズム角度 (分散方向)	10 度
プリズム角度 (非分散方向)	30 度
格子幅	13.33 μm
格子密度	75 grooves/mm

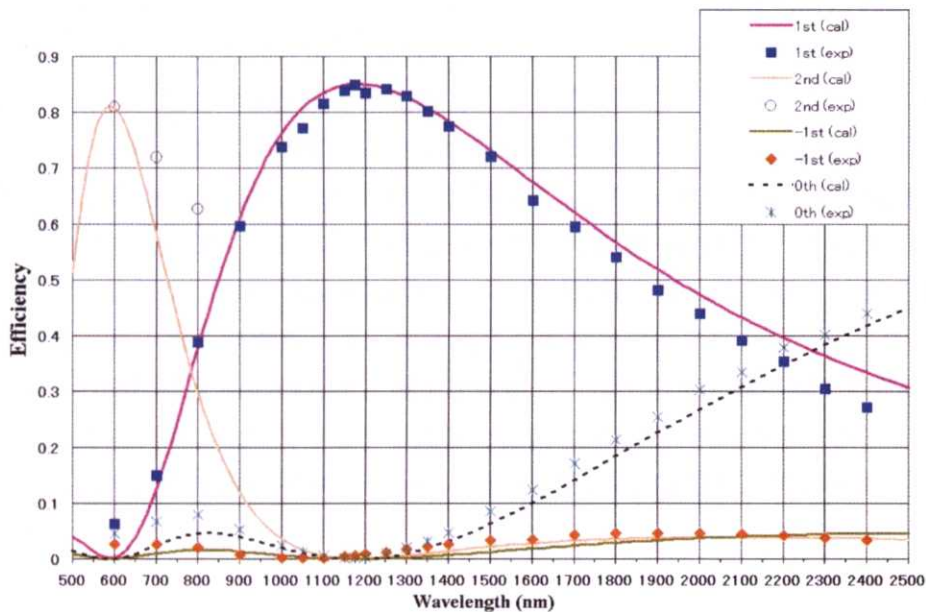


Figure 2-3-11: Grism efficiency.

グリズムの回折効率

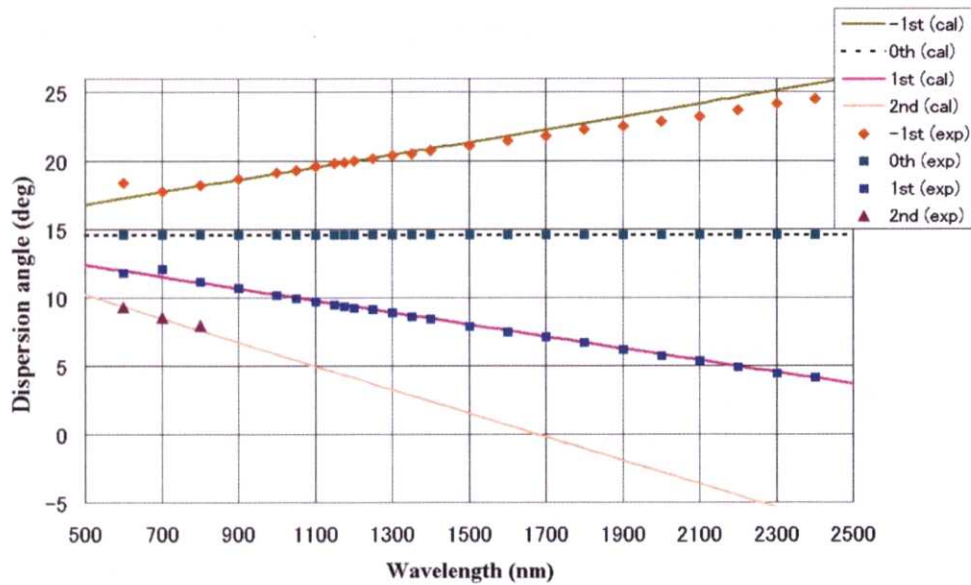


Figure 2-3-12: Diffraction angle of grism.

グリズムの回折角

2-3-2 検出器

NIRS-S の検出器の性能諸元を Table 2-3-4 に示す。本分光器開発当時に近赤外線域の熱起電型の検出器としては HgCdTe と InGaAs があった。HgCdTe はすでに 2 次元のものが市販化されており、地上の望遠鏡の検出器としても使用されていたが、十分な S/N を得るには検出器を -50 度以下に冷却することが必要と考えられることと、2 μm 以下の観測波長域では InGaAs の方が D*値（比検出能力）が高いことから InGaAs の検出器を採用した。当時 InGaAs は 1 次元アレイについてはカットオフが 1700 nm 程度のものが入手可能になったところであったが、2100 nm 程度のカットオフ波長を持つ検出器を新規に製作し使用した。検出器の素子数、画素ピッチ、画素高さも光学系の仕様に合うものを新規に開発した。検出器の内部には 2 段のペルチエ素子を内蔵し、電子冷却で検出器を外部温度より 30 度程度低い温度にすることができる。また検出器内部に CMOS 回路を内蔵して、駆動信号を入力することで、検出器各画素のチャージアンプと明暗信号の差分読み出しが検出器内部で行える。

Table 2-3-4: Specification of detector.

検出器の性能緒言

種類	InGaAs リニアイメージセンサー (1次元フォトダイオードアレイ)
画素ピッチ	50 μm
画素高さ	100 μm
画素数	64
暗電流(A)*1	38.3 pA(0°C)、15.6 pA(-10°C) 6.24 pA(-20°C)、3.09 pA(-30°C)
NEI (A/Hz ^{1/2})*2	2.96 × 10 ⁻¹⁴ (0°C)、2.53 × 10 ⁻¹⁴ (-10°C) 2.29 × 10 ⁻¹⁴ (-20°C)、2.23 × 10 ⁻¹⁴ (-30°C)
積分容量	10 pF
飽和電荷量	10 pC 以上
冷却素子	2 段ペルチエ素子
感度特性*3	Figure 2-3-17 参照

※ 1,2: 検出器 FM 品(#3)の実験室での測定値。温度特性は Figure 2-3-13~Figure 2-3-16 参照。

※ 2: NEI は暗電流値の揺らぎを測定(単位 A/Hz^{1/2})。積分時間 30.5 ms の値を表中に示す。

※ 3: 検出器 FM 品(#3)の実験室での測定値。

NIRS で採用している InGaAs 検出器 (リニアイメージセンサー; LIS) は、N 型 InGaAs 基板とその上に形成された P 型拡散層からなる PN 結合フォトダイオードを受光部に持つ。フォトンが受光部に入射するとダイオードで電荷が発生し、光生成電流となり明出力として出力される。しかし、フォトンが入射しなくとも、フォトダイオードの空乏層内の再結合電流やリーク電流によって暗電流が発生する。明出力には、この暗電流による暗出力が加わるため、暗電流が大きくなると、明出力のダイナミックレンジが狭くなってしまう。小惑星からの反射光は微弱であるため、明出力と暗出力が同程度の大きさを持つ。このため、NIRS ではシャッターの開閉を利用したチョッピングにより、明出力から暗出力を差引く信号処理ができるように設計されている。暗電流は DC 成分の電流性雑音であり、一定の値を持っていることから、この手法でキャンセルすることが可能である。暗出力電圧 V_d (V)、コンデンサー積分容量 C_f (pF)、積分時間 T_s (s)を用いると暗電流 I_d は次式で表わされる。

$$I_d = V_d \frac{C_f}{T_s}$$

暗出力には、信号が出力される過程で起る不規則な電圧・電流・電荷の揺らぎによって生じるランダムな雑音成分を含んでいる。このランダム雑音は、暗電流の時のような信号処理ではキャンセルできないため、微弱光を測定する際の検出限界を決定する重要な物理量である。暗出力電圧の標準偏差 $V_{std}(V)$ 、コンデンサー積分容量 $C_f=10(pF)$ 、積分時間 $T_s(s)$ を用いると等価雑音電流 NEI は次式で表わされる。

$$NEI = V_{std} \frac{C_f}{\sqrt{T_s}}$$

これらの特性を調べるために、検出器単体を遮光した状態で、検出器の温度、積分時間、ゲイン、バイアスをそれぞれ変化させ、200回サンプリングでデータを取得した。InGaAs 検出器ペルチエ素子電圧を変化させ、異なる動作温度で 1ch~64ch の暗電流測定結果を Figure 2-3-13 に、NEI を Figure 2-3-15 にそれぞれ示す。検出器温度が $-30^{\circ}C \sim +30^{\circ}C$ の範囲で、積分時間 30.536ms、ゲイン 1 倍、バイアス 10mV の条件下で取得した測定結果を示す。試験暗電流と NEI の温度依存性グラフを Figure 2-3-14 と Figure 2-3-16 にそれぞれ示す。

Figure 2-3-13 と Figure 2-3-14 によると、暗電流は検出器の温度に対して指数関数的に増加している。 $+30^{\circ}C$ の高温条件下では飽和ピクセルが発生しているため多少ずれるが、

$$\log(\text{暗電流}) = \log(1.087) * T[^{\circ}C] + \text{定数}$$

の関係が成り立つことが分かる。

また Figure 2-3-15 と Figure 2-3-16 によると、暗出力の揺らぎに相当する NEI は温度の低下に伴い、暗出力が下がることに伴って低下していることが分かるが、温度が $-15^{\circ}C$ より低下すると暗出力の平方根に比例するショットノイズに比べて、回路の読み出しノイズが支配的になる。このことから、検出器の駆動温度 $-15^{\circ}C$ 程度が適当であると考えられる。

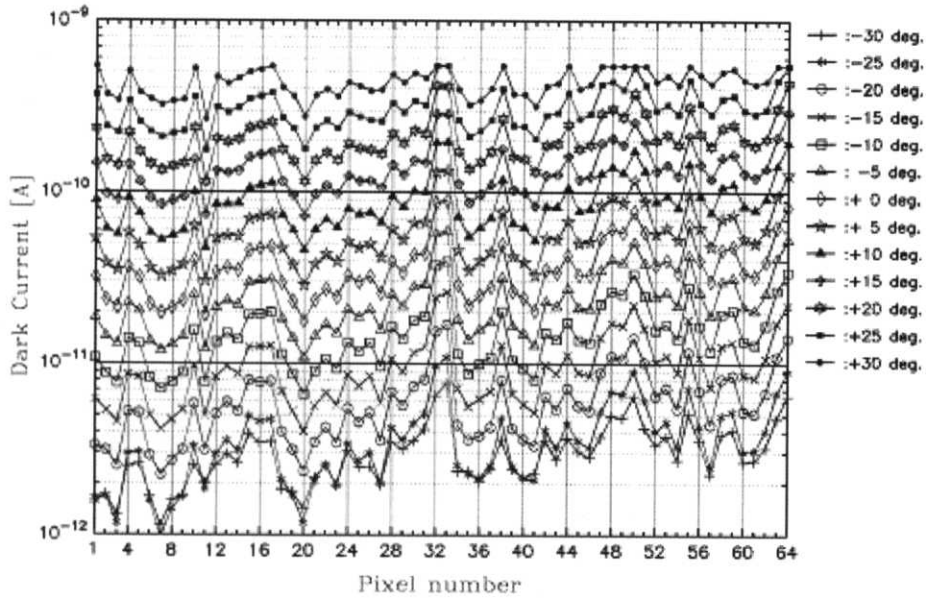


Figure 2-3-13: Temperature characteristics of dark current.
暗電流の温度特性 (1ch - 64ch)

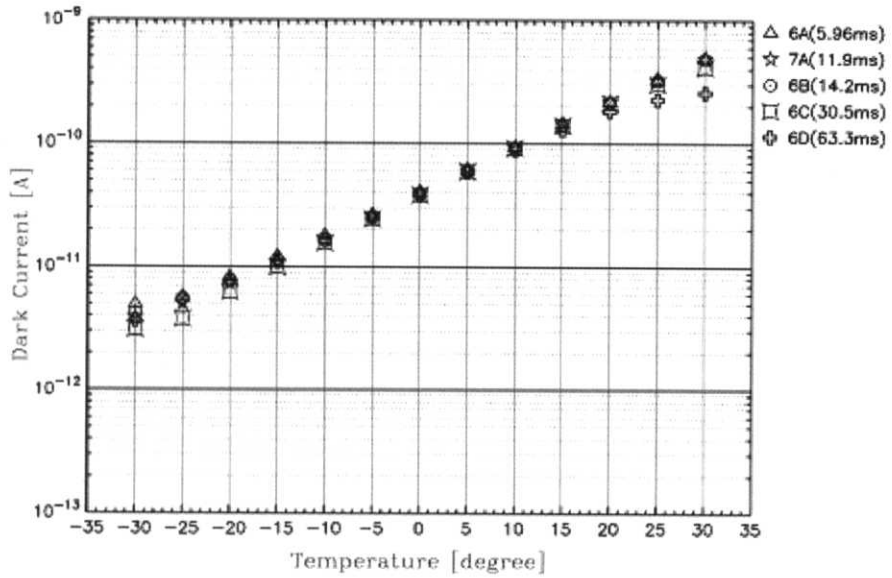


Figure 2-3-14: Temperature characteristics of dark current.
暗電流の温度特性 (積分時間ごと)

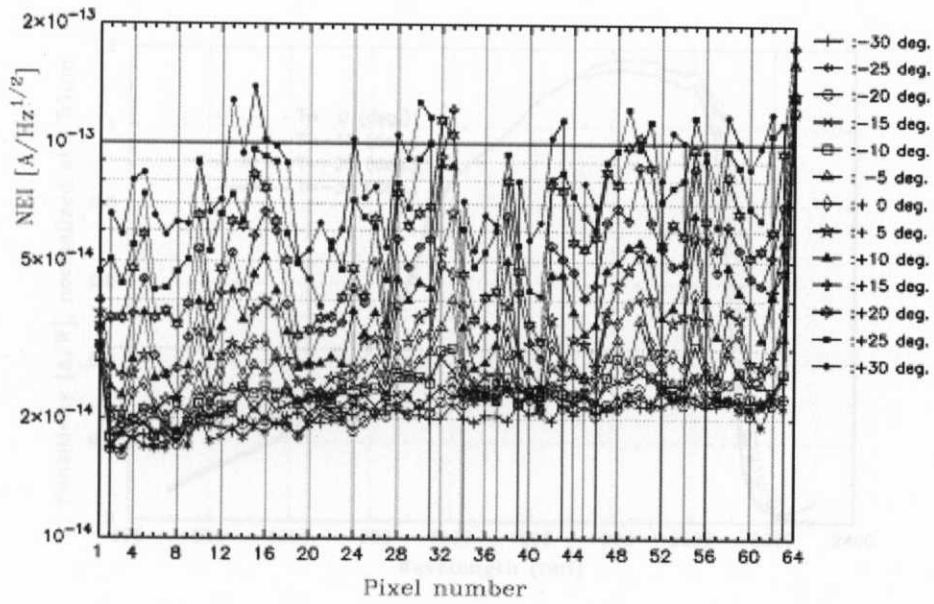


Figure 2-3-15: Temperature characteristics of NEI.
NEI の温度特性 (1ch - 64ch)

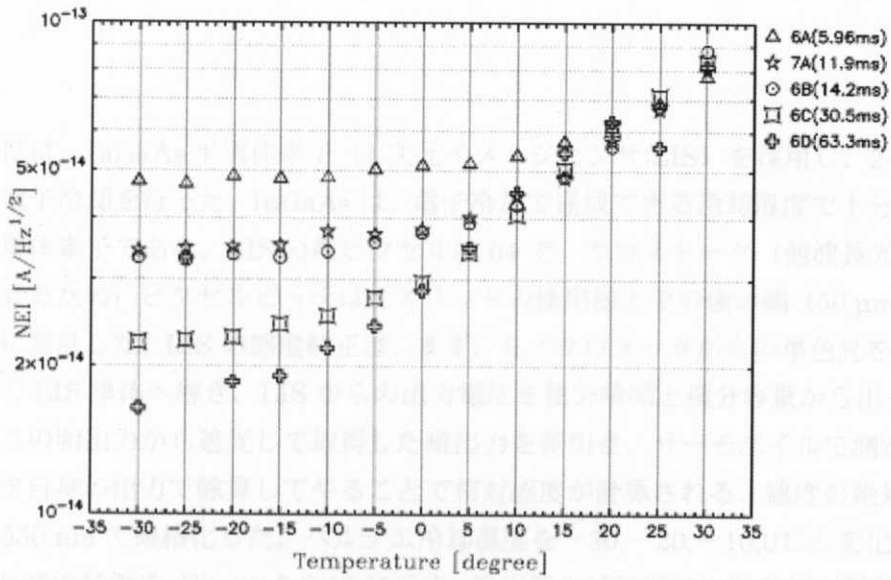


Figure 2-3-16: Temperature characteristics of NEI.
NEI の温度特性 (積分時間ごと)

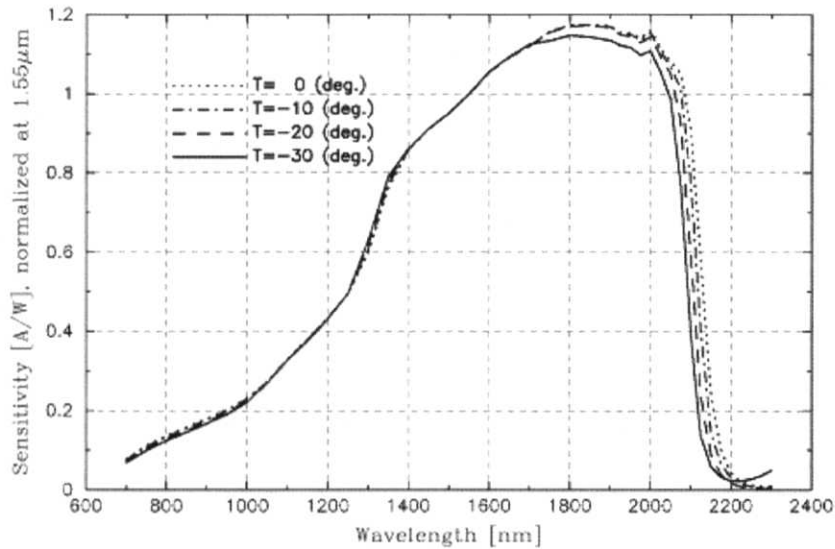


Figure 2-3-17: Sensitivity of the detector.

リニアイメージセンサーの感度特性（温度ごと）

検出器には、InGaAs 半導体素子（1次元イメージセンサ:LIS）を採用し、2段ペルチエ素子での電子冷却を行った。InGaAs は、電子冷却で達成できる冷却温度で十分な感度特性を持つ半導体素子である。LIS の総ピクセルは 64 で、クロストーク（他波長光の漏込み）を低減させるため、ピクセルピッチは、スリットの検出器上での像の幅（50 μm）と同じになるように設計した。LIS の感度較正は、まず、モノクロメータからの単色光を積分球で一様光にして LIS 単体へ導き、LIS からの出力電圧を積分時間と積分容量から出力電流に変換する。この明出力から遮光して取得した暗出力を差引き、サーモパイルで測定したモノクロメータ自身の出力で除算してやることで相対感度が計算される。感度の絶対較正は、1A/W@1550 nm で規格化した。ペルチエ冷却温度を−30, −20, −10, 0℃と変化させた時の LIS の波長感度特性を Figure 2-3-17 に示す。検出器の試験温度の高温側上限が 0℃までなのは、0℃より高い温度では、すでに暗出力レベルが高く、さらに入光させると飽和するピクセルが現れてしまうためである。

Figure 2-3-17 によると、2100 nm より長波長側では、LIS 温度が高くなるほど感度が高くなる傾向があることがわかる。

2-3-3 校正用ランプとLED

感度校正ランプの性能緒言を Table 2-3-4 に記す。搭載ランプは MIL 規格認定ランプで、小型で長寿命のものを選定した。ランプはゲインを 4 段階に変えて駆動できるようにしている。ランプ電圧 3V で駆動した場合に本分光器で取得したランプのスペクトルを Figure 2-3-18 に示す。試験はランプ単体を恒温槽内に設置し窓を介して NIRS で測定している。温度の低下に伴って出力が減少する傾向がある。

波長校正 LED の性能緒言を Table 2-3-5 に示す。LED は本分光器の観測波長で LIDAR の出力パルスの波長(1064 nm)から離れた波長に中心波長をもつものを選定した。本分光器で取得した LED のスペクトルを Figure 2-3-19 に示す。試験はランプ単体を恒温槽内に設置し窓を介して NIRS で測定している。温度の低下に伴って出力が増加し、中心波長が短波長側にシフトする傾向がある。

Table 2-3-4: Specification of responsivity calibration lamp.

感度校正用ランプの性能緒言

型式	MS24367-713 AS15
定格駆動条件	5.0V 75±7.5 mA
使用駆動条件	1.005 V、2.144 V、3.023 V、4.037 V
寿命	16,000 時間

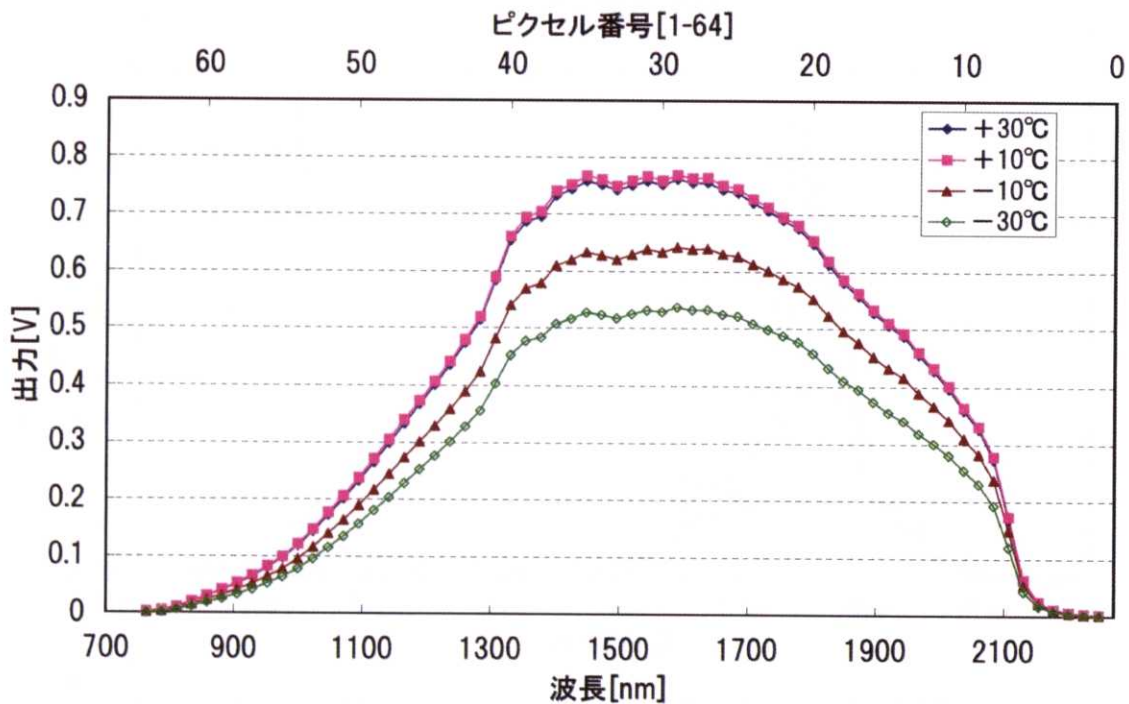


Figure 2-3-18: Spectrum of calibration lamp obtained by NIRS-S.
NIRS-S で取得した較正用ランプのスペクトル

Table 2-3-5: Specification of wavelength calibration LED.
波長較正用 LED の性能緒言

型式	MID-IR LED 1.8LED
放射ピーク波長、バンド幅 ※	1.84 μm FWHM=0.15 μm
ピーク波長の温度ドリフト	1.16 nm/K (単体スペック ; 1 nm/K)
出力	1.73 mW 80 mA、
最大電流値	150 mA DC

※ 測定条件 ; 温度 300K、駆動電流 50 mA。

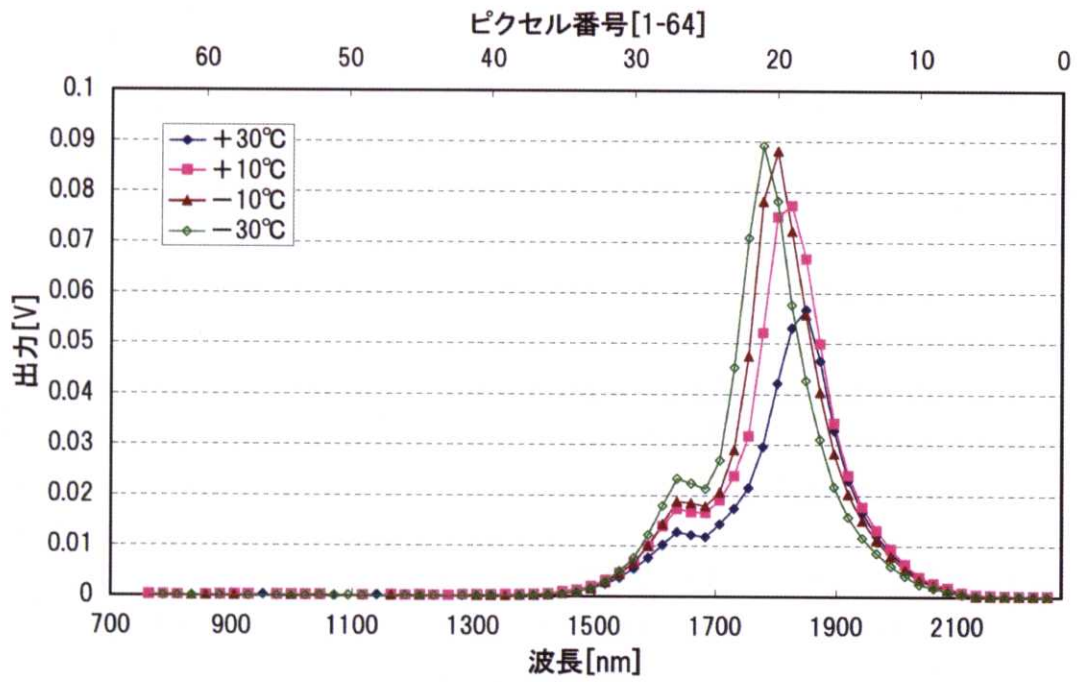


Figure 2-3-19: Spectrum of calibration LED obtained by NIRS-S.
NIRS-S で取得した LED スペクトル

2-4 小惑星観測時の S/N の見積もり

2-3 章までに議論した、グリズムの効率、検出器の感度特性、検出器の暗出力特性を元に小惑星観測時の予測 S/N を計算したのが Figure 2-4-1 である。予測フラックスの見積もりには、小惑星の反射率を 0.3 と仮定し、スペクトルは Binzel *et al.* (2001a) による地上観測で得られているデータを用い、観測時の太陽からの距離を 1AU とした。光学系の効率は、グリズムの効率についてはブレイズ波長での効率を 85% とした理論式を用い、レンズアセンブリとミラーアセンブリについては実測値を用いた。レンズアセンブリの効率は観測波長範囲で 88~95%、ミラーアセンブリの効率は観測波長範囲でほぼ 99% である。ノイズについては、検出器の NEI 測定結果をもとにした暗出力の揺らぎと、小惑星からのフラックスをもとにした明出力ショットノイズを考えた。Figure 2-4-1 は検出器の温度が -10°C で積分時間が 30.54msec の場合の結果である。

この結果から、製作した検出器、グリズム、光学系の組み合わせで、小惑星イトカワを観測した場合、 -10°C 程度の冷却と最大積分時間 65.536msec の半分程度の積分時間で、目標の S/N100 以上を 750nm~2100nm の観測波長範囲で達成できそうであることが確認された。よって、実際の小惑星上での検出器の冷却温度は -10°C 程度をノミナルに考えればよい。

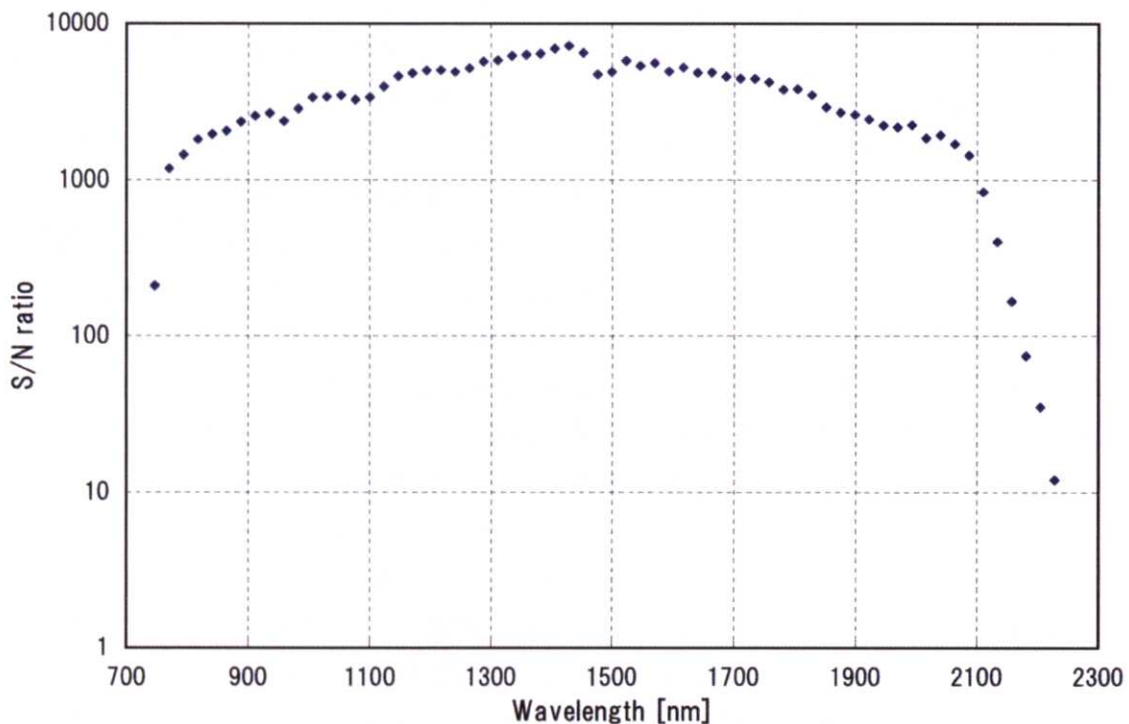


Figure 2-4-1: S/N ratio estimation of NIRS.

NIRS の小惑星観測時の予測 S/N

2-5 本分光器の構成

2-5-1 本分光器の動作概要

本分光器の NIRS-S は NIX-E に含まれる NIRS-E により駆動する。NIRS-E からは電源および検出器の駆動信号、ペルチエ、シャッター、ランプ、LED の駆動信号が送られ、NIRS-S からは、検出器のビデオデータや HK データ（光学系温度、検出器温度、ペルチエ電流、シャッター電流、ランプ電流、LED 電流）が送られる。NIRS-S で使用する電圧は 5V 系と 12V 系の 2 種類である。NIRS-S 内部の ADC で検出器のビデオデータと HK データをデジタル化(14bit)する。検出器ビデオデータ (64ch) と HK データ(6ch)は NIRS-S と NIRS-E の間で RS422 によって 8bit バスで I/F される。

2-5-2 本分光器のブロック図とモード遷移図

NIRS の電氣的なブロック図を Figure 2-5-1 に示す。図の右側（90 度回転して貼り付けてあるので上側）は NIRS-E に搭載されている機能、左側（90 度回転して貼り付けてあるので下側）は NIRS-S 内部の基板に搭載されている機能である。

NIRS のモード遷移図を Figure 2-5-2 に示す。NIX-E に電源を供給すると、自動的に初期化してシステム ROM を読み込みスタンバイ状態（図中の INITIAL）になる。そのあと EXEC コマンドを送信して、ユーザープログラムを実行させる（図中の CPU-RUN）。この状態で NIRS_ON のコマンドを送信すると、NIRS-E が自動的に初期化されて検出器にも電源が供給される（図中の SYBY1）。この状態から COOL_ON コマンドでペルチエ冷却素子の電源を入れて温度コントロール開始する。温度コントロールは低電圧駆動のモードと一定温度制御のモードがあり、ともに 4 種類コマンドで指定することができる。また SHUT_ON コマンドでシャッターに電源を供給する。シャッターの駆動は Open, Close, Chop の 3 種類があり、Chop は 131.072 msec の一定周期で Open と Close を繰り返すモードである。クーラーとシャッターに電源を供給した状態を STBY2 と呼ぶ。観測を開始する場合は、この状態で OBS_STRT コマンドを送信すると、FIFO からデータを読み出し、64 チャンネルの画素データおよび、HK データ 6 種（光学系温度、検出器温度、ペルチエ供給電流、シャッター供給電流、ランプ供給電流、LED 供給電流）を読み出し、観測モードに応じてデータをスタックし、NIX-E を介して、探査機のデータレコーダに観測データを保存することができる。なお、STBY2 の状態で LAMP_ON や LED_ON のコマンドを送信することで CAL 状態に移行することもできる。この状態で OBS_STRT コマンドを送信することで、Cal データを取得することができる。NIX-E の CPU に搭載されたユーザープログラムは打ち上げ後も書き換えが可能である。INITIAL 状態で ROM-WRITE コマンドを送信することで、メモリー書き込みが可能になり、ROM-DUMP コマンドを送信するこ

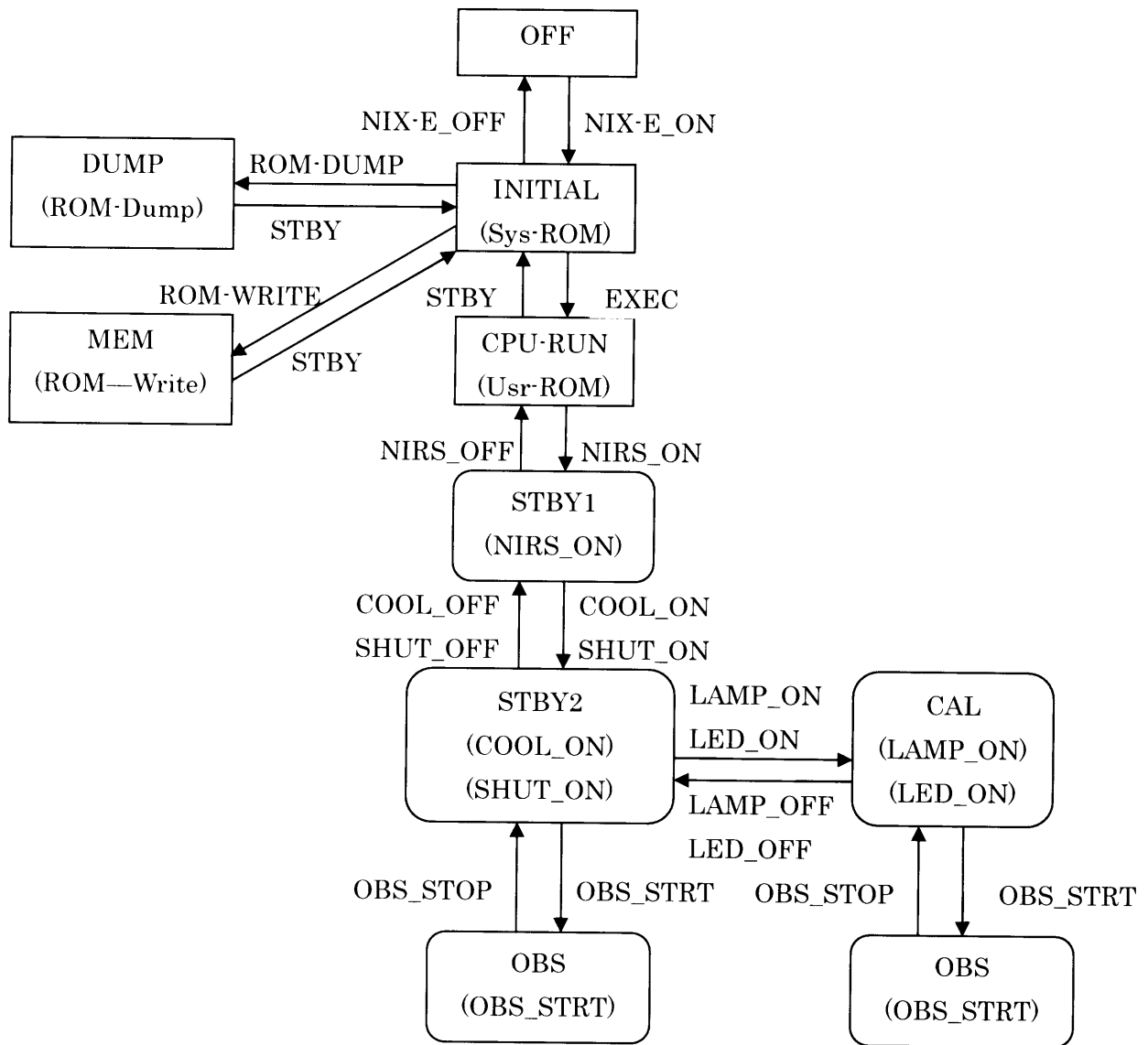


Figure 2-5-2: Mode change diagram of NIRS.

NIRS のモード遷移図

2-5-3 本分光器の概観図

NIRS-Sの外観図を Figure 2-5-3~Figure 2-5-6 に示す。NIRS-Sのおおよそのサイズは底面（取り付け面）が 300 mm x 150 mm で高さが 100 mm の直方体である。入光部にはフードがついている。第 1 反射鏡の後ろのスペースは軽量化のために切り落とした形である。光学ベンチはマグネシウム合金、光学ベンチ上部のカバーは炭素繊維強化樹脂材を用いることで軽量化を実現した。ペルチエ素子の廃熱は、光学ベンチ下面の探査機との取り付け面を介して、-Y パネル外部のラジエータより排出する。NIRS-S の下面から 25x25 mm で長さ 70 mm 程度の角柱がのびているが、これはアライメントキューブを取り付けるジグで打ち上げ前のアライメント測定後に外される。アライメントキューブは NIRS-S を-Y パネルに取り付け後、-Y パネルにあけた穴を介して、アライメントキューブが探査機外部に出て外からアライメントの確認ができる。

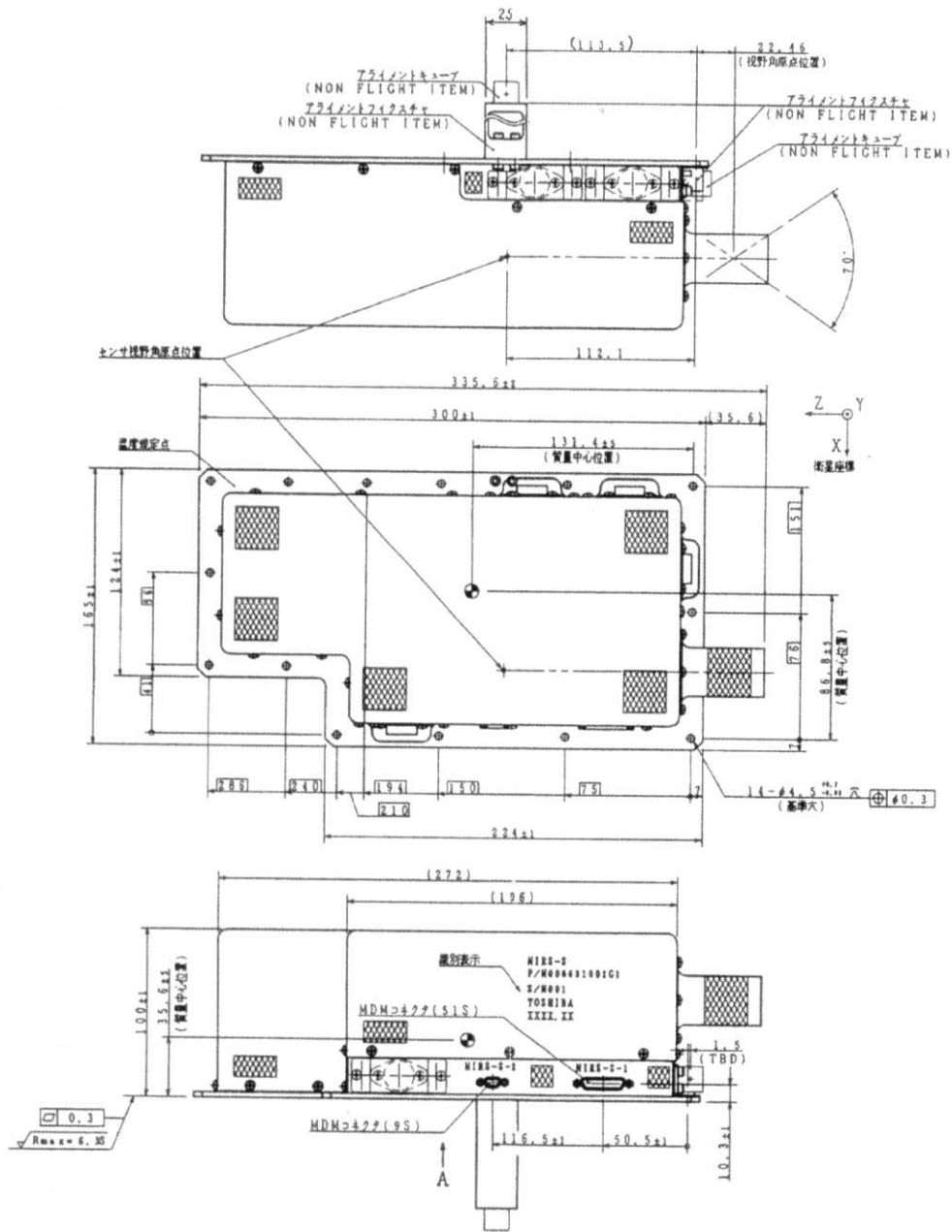
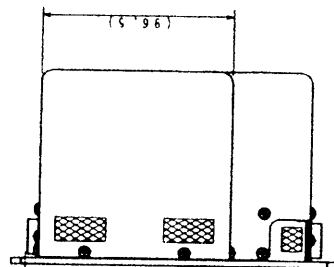
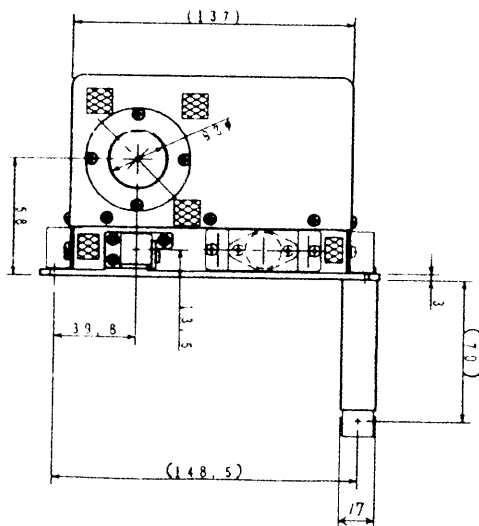


Figure 2-5-3: Outline of NIRS-S.

NIRS-S の概観図 1



A矢視図
 (接触面積: 21329mm²)

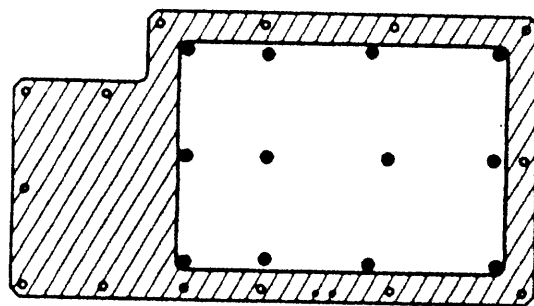


Figure 2-5-4: Outline of NIRS-S.
 NIRS-S の外観図 2

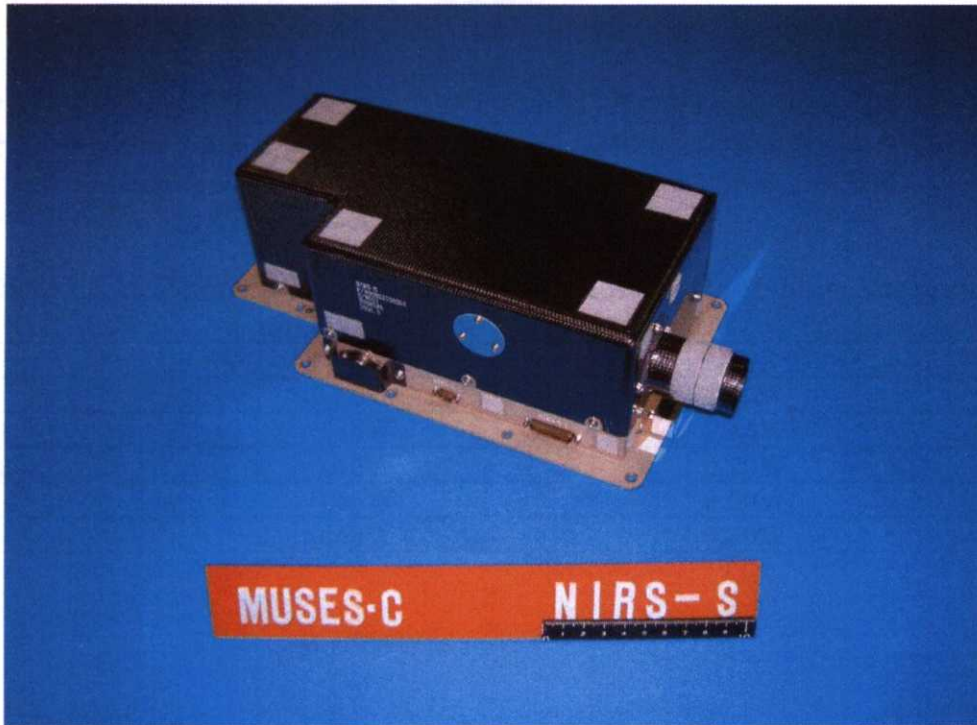


Figure 2-5-5: Photograph of NIRS-S' outside.
NIRS-S の概観写真

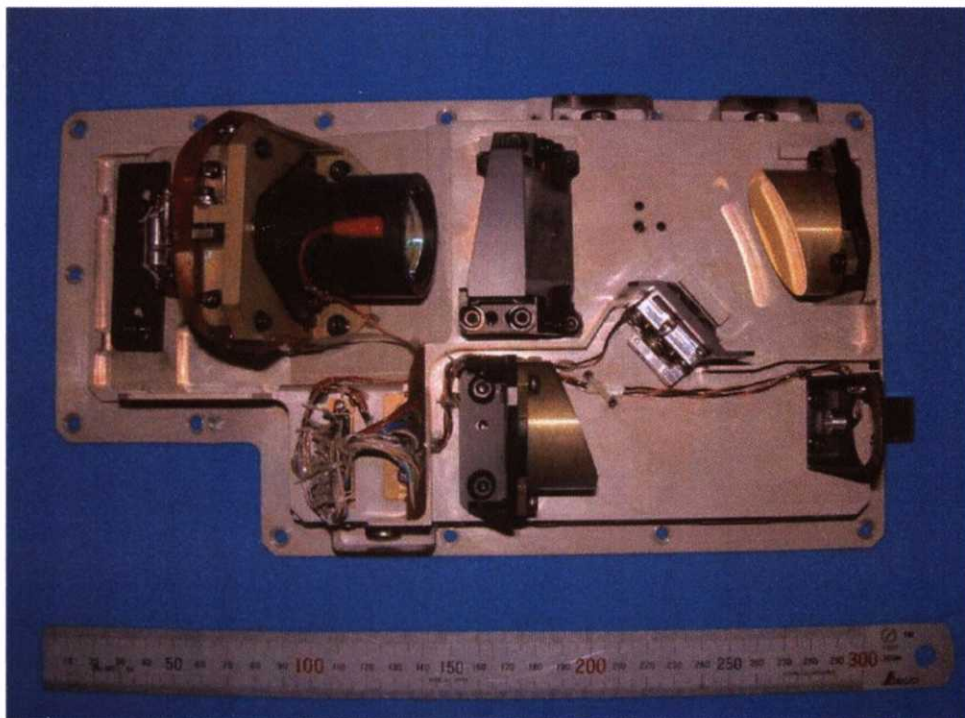


Figure 2-5-6: Photograph of NIRS-S' inside.
NIRS-S の内部概観写真

2-5-4 本分光器の重量・サイズ・消費電力

本分光器の最終的な重量は 1.534 kg、サイズは 335.6×165×100 mm である。

消費電力を Table 2-5-1 にまとめる。STBY1 から STBY2 で消費電力が大きく変わるのはペルチエ素子に電源を投入することによる消費電力の増加分である。消費電力の見積もりはペルチエが最大電圧で駆動した場合の値である。

Table 2-5-1 : Power consumption in each operation mode of this spectrometer.

本分光器の各動作モードにおける消費電力

	NIRS-E	NIRS-S
OFF	0.45W	0.00W
STBY1	0.45W	2.45W
STBY2	0.45W	9.20W
OBS	0.45W	9.20W
CAL	0.45W	9.50W

2-6 ソフトウェアの機能

ここでは NIRS のハードウェアとソフトウェアの制御方法について述べる。

2-6-1 ハードウェアの制御

NIRS のハードウェアの制御には以下のような項目がある。

- ・ NIRS-S の電源の ON/OFF
- ・ シャッター電源の ON/OFF
- ・ ペルチエ電源の ON/OFF
- ・ 校正ランプの ON/OFF
- ・ 校正 LED の ON/OFF
- ・ シャッターモードの変更：Open/Chop/Close の 3 段階
- ・ プリアンプ利得の変更：4 段階
- ・ 校正ランプの強度変更：4 段階
- ・ ペルチエの制御：閉ループの場合、温度 4 段階：+8.4, -4.2, -14.3, -23.1℃
：開ループの場合、電圧 4 段階：1.25, 1.60, 2.00, 2.50V
- ・ 積分時間の変更：256 (8bit) 段階。(シャッター同期制御のときは $n(8\text{bit}) \times 256\mu\text{s} + 256\mu\text{s}$ 、シャッター非同期のときは $n(8\text{bit}) \times 256\mu\text{s} + 260\mu\text{s}$)
- ・ 積分タイミング制御：シャッター同期/シャッター非同期

これらのハードウェア制御は、次節で述べる動作モードとは独立に行われる。

2-6-2 データ取得

NIRS はソフトウェアの制御によって、観測動作モードを切り替える。Figure 2-6-1 に示すように、OBS_START と OBS_STOP の状態があり、OBS_START の状態になると、FIFO のリセットを行い、その後に FIFO に出力されたデータから、先頭ピクセルの出力データを探し、データの処理を開始する。

OBS_START の状態で行う観測モードには、データ出力の方法の違いによって 5 種類のモードがある。それぞれの観測モードにおけるデータ処理の詳細を次に述べる。

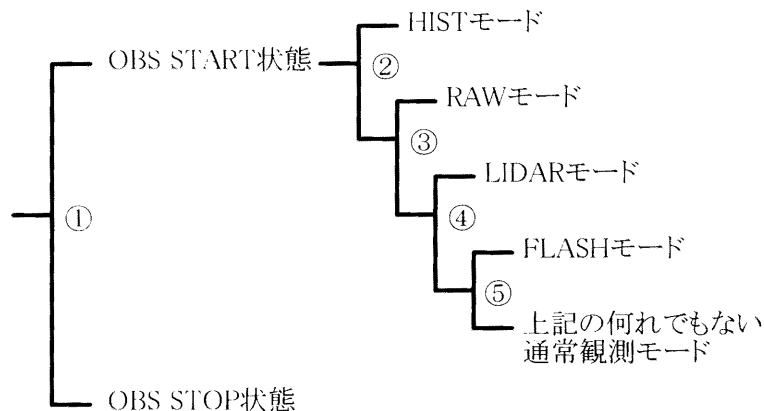


Figure 2-6-1 : NIRS observational mode.

NIRS の観測動作モード

○通常観測モード（観測データをピクセルごとにスタックして出力）

- ・ LIS データ(チャンネル 0~63)に関しては、ピクセルごとに連続した 2 回のデータの間で引き算を行い、暗電流の差し引きを行う（ON/OFF 可能。OFF の場合には差し引きは行わず個別の独立したデータとして扱う。差し引き ON の場合には積分はシャッターを chop とし、積分はシャッターと同期して行う）。ただし、シャッターの OPEN の状態と CLOSE の状態の識別が不可能なため、どちらの状態の時のデータからどちらの状態の時のデータを引いたかは、オンボードでは判定不能。したがって、各ピクセルのデータは符号付であり、判定は地上において行う必要がある。

- ・ NIRS-S からピクセルデータに続けて送られてくる HK データ（チャンネル 64~69：具体的には OPT_TEMP, LIS_TEMP, COOLER_CURRENT, SHUTTER_CURRENT, LAMP_CURRENT, LED_CURRENT の 6 つ）に関しては、差し引きは行わず、単純にチャンネルごとに各回の和を求め、平均を計算する。

- ・ スタック回数は可変(2 の N 乗)[1~ 2^{255} 回]。
- ・ スタックデータの平均は常に計算し、 2^N のデータごとに 1 回出力。
- ・ スタックデータの分散の計算および出力は ON/OFF 可能。
- ・ スタックデータの最大値・最小値の計算および出力は ON/OFF 可能。

○FLASH モード（FLASH は探査機が小惑星表面にタッチダウンする際に目印になるターゲットマーカを照らすために 2 秒に 1 回発光する光源である。NIRS ではこの発光が観測の邪魔になる可能性があるため、FLASH に同期したデータを除いてピクセルごとにスタックして出力させる）

- ・ FLASH に同期したデータを除いてスタックする点以外は、上記通常観測モードと同じ。暗電流の差し引きが ON になっている場合は、連続した 2 回のデータのどちらかと同期していれば、そのデータは除いてスタックする。

・このモードは小惑星表面降下中に LIDAR (LIDAR は小惑星との相対距離を測るために小惑星滞在中は常時 1 秒に 1 回レーザ光を発光させる装置である) や FLASH の反射光が NIRS でも検出できるようになって、かつそれらのデータを除去したい場合に使用する。LIDAR は 1 秒に 1 回、FLASH は 2 秒に 1 回発光している。一方 NIRS のデータは 131msec 周期で明・暗出力のデータを取得している (実際に NIRS が積分しているのはさらにその一部の時間である) ので、除去されるデータはわずかである。

○LIDAR モード (LIDAR に同期したデータのみをピクセルごとにスタックして出力)

・LIDAR 同期パルスを受けた時のデータから、次のデータの引き算をピクセルごとに行うことで、LIDAR 反射光データの取得を行う。この観測はシャッターモードが OPEN の状態で行う。

・スタック回数は可変

(2 の N 乗)[1~2²⁵⁵ 回]。

・スタックデータの平均は常に計算し、2^N のデータごとに 1 回出力。

・LIDAR モードにおいては、スタックデータの分散は常に計算・出力。

・LIDAR モードにおいては、スタックデータの最大値・最小値は常に計算・出力。

○RAW モード (FIFO データの生出力)

・FIFO から読み取ったデータをそのまま加工せず出力する。

・データのスタックは行わないので、平均・分散・最大・最小の出力はない。

・データに含まれる先頭ピクセルビット、LIDAR 同期ビットもそのまま出力される。

○HIST モード (HK 履歴データ出力)

・FIFO から読み取った HK データ (64~69 チャンネル: 具体的には OPT_TEMP, LIS_TEMP, COOLER_CURRENT, SHUTTER_CURRENT, LAMP_CURRENT, LED_CURRENT の 6 つ) 部分のみを連続して出力するモード。

・FIFO から読み取ったデータのうち、2^N 個[N は 0~15]を読み飛ばして出力する。

・1 個の DATA SET には 10 回のデータが格納される。

NIRS の動作に関連するコマンド一覧とテレメトリ一覧を Appendix 2 に示す。

2-7 データフォーマット

NIRS の観測データは、ミッションパケットとして探査機のデータレコーダに格納され、適切なタイミングで再生させることで、地上で取得を行うことができる。はやぶさのテレメトリデータは CCSDS Packet フォーマットで収集される。NIRS のデータパケットの概要を Table 2-7-1 に示す。

1つのデータパケットには通常 6 つのデータセットが格納されている。データセットのフォーマットを Table 2-7-2 に示す。データセットに記述されている内容のうち、Data type および OBS parameter の詳細について、Table 2-7-3 および Table 2-7-4 に示す。

データセットの中に記述される Data 部の内容は観測モードによって異なる。HISTORY モードにおける Data 部の詳細を Table 2-7-5 に、RAW モードにおける Data 部の詳細を Table 2-7-6 に、それ以外の場合の Data 部の詳細を Table 2-7-7 に示す。

Table 2-7-1 : NIRS mission packet format.
NIRS のミッションパケットのフォーマット

WORD	NUMBER OF BYTE	FUNCTION
0	1	0x0D (FIX)
1	1	0x72 (FIX)
2	2	上位 2bit : Packet Seq. Flag (11 FIX) 下位 14 bit : Packet Seq. Count
4	2	Packet Length (0x0406=1030 FIX)
6	4	Time
10	1	Category (0x72 FIX)
11	1	Packet ID (0x01 FIX)
12	1	上位 2bit : Packet Seq. Flag for ADU* (11 FIX) 下位 6 bit : ADU Count
13	170	DATA SET 1
183	170	DATA SET 2
353	170	DATA SET 3
523	170	DATA SET 4
693	170	DATA SET 5
863	170	DATA SET 6
1033	4	SPARE

※ADU(Application Data Unit)は CCSDS パケットの上位のデータ単位である。NIRS のデータは CCSDS パケット 1 単位より長い ADU はないので、ADU の Packet Sequence Flag は unsegmented User Data であることを示す 11 で固定とする。

Table 2-7-2 : Contents of DATA SET.

データセットの内容

WORD OFFSET	NUMBER OF BYTE	FUNCTION
0	3	DATA ID [ASCII 文字列=AVE, DEV, MAX, MIN, or HIS]
3	1	DATA type
4	4	この DATA SET を作成した時の TI [4Byte 符号無し整数]
8	1	N_irq_counter [DEBUG 用 (RAW MODE のみ)]
9	1	N_irq_counter_read [DEBUG 用 (RAW MODE のみ)]
10	1	SPARE
11	1	実際に stack された数 [LIDAR MODE のみ, 符号無し整数]
12	1	OBS Parameter
13	1	Stack Count Index
14	1	H/W HK (general_status) NIX-E アドレス = 0x01a000000
15	1	H/W HK (shutter_mode) NIX-E アドレス = 0x01a000002
16	1	H/W HK (cooler_pid) NIX-E アドレス = 0x01a000004
17	1	H/W HK (lis_gain) NIX-E アドレス = 0x01a000006
18	1	H/W HK (lamp_gain) NIX-E アドレス = 0x01a000008
19	1	H/W HK (integ_time) NIX-E アドレス = 0x01a00000a
20	1	H/W HK (obs_mode) NIX-E アドレス = 0x01a00000c
21	1	H/W HK (nirs_flag) NIX-E アドレス = 0x01a00000e
22	2	SPARE
24	1	FIFO reset count [積算, 符号無し整数]
25	1	LIDAR count [この Data Set 中, 符号無し整数]
26	2	Pixel maximum [14bit 符号無し整数, 上位 2bit は 0]
28	1	Pixel maximum channel [符号無し整数 (0~63)]
29	1	SPARE
30	140	DATA 部

Table 2-7-3 : DATA type.

DATA type 詳細

0x00	RAW Data
0x01	Average
0x02	Deviation
0x03	Max
0x04	Min
0x11	Average (LIDAR mode)
0x12	Deviation (LIDAR mode)
0x13	Max (LIDAR mode)
0x14	Min (LIDAR mode)
0x20	not data
0x17	Temperature History

Table 2-7-4 : OBS parameter.

OBS parameter 詳細

MSB		LSB		N = 0		N = 1	
N					Pixel Data		Hist Mode
	N				Normal Mode		LIDAR Mode
		N			暗電流引かない		暗電流引く
			N		分散出力しない		分散出力する,
				N	最大最小出力しない		最大最小出力する
					SPARE		
				N	Normal Mode		Flash Mode
				N	STACK Mode		RAW Mode

Table 2-7-5 : Contents of Data part at HISTORY mode.

HISTORY モードにおける Data 部詳細

WORD OFFSET	NUMBER OF BYTE	FUNCTION
30	2	TI 下位 2 Byte
32	12	H/W HK DATA (HK 0~5×2 Byte)
44	2	TI 下位 2 Byte
46	12	H/W HK DATA (HK 0~5×2 Byte)
58	2	TI 下位 2 Byte
60	12	H/W HK DATA (HK 0~5×2 Byte)
72	2	TI 下位 2 Byte
74	12	H/W HK DATA (HK 0~5×2 Byte)
86	2	TI 下位 2 Byte
88	12	H/W HK DATA (HK 0~5×2 Byte)
100	2	TI 下位 2 Byte
102	12	H/W HK DATA (HK 0~5×2 Byte)
114	2	TI 下位 2 Byte
116	12	H/W HK DATA (HK 0~5×2 Byte)
128	2	TI 下位 2 Byte
130	12	H/W HK DATA (HK 0~5×2 Byte)
142	2	TI 下位 2 Byte
144	12	H/W HK DATA (HK 0~5×2 Byte)
156	2	TI 下位 2 Byte
158	12	H/W HK DATA (HK 0~5×2 Byte)

※ ここでの H/W HK DATA とは具体的には OPT_TEMP, LIS_TEMP, COOLER_CURRENT, SHUTTER_CURRENT, LAMP_CURRENT, LED_CURRENT の 6 つ。

※ H/W HK DATA は 2 Byte 符号無し整数で、下位 14 ビットが NIRS-S A/D からのデータ。上位 2 ビットは 0。

※ 各 TI は、それに続いて書き込まれている H/W HK DATA を読んだ時の TI。

Table 2-7-6 : Contents of Data part at RAW mode.

RAW モードにおける Data 部詳細

WORD OFFSET	NUMBER OF BYTE	FUNCTION
30	140	FIFO 読み取り値 (0~69 channel×2 Byte)

※ 2 Byte 符号無し整数で、下位 14 ビットが NIRS-S A/D からのデータ。最上位ビットは 1 ピクセル目フラグ、2 ビット目は LIDAR フラグ。

Table 2-7-7 : Contents of Data part at the other mode.

その他のモードにおける Data 部詳細

WORD OFFSET	NUMBER OF BYTE	FUNCTION
30	128	PIXEL DATA (0~63 channel×2 Byte)
158	12	H/W HK DATA (HK 0~5×2 Byte)

※ いずれも、スタックを行ったデータの平均、分散、最大、最小のいずれか (WORD OFFSET 3 の Data Type により識別)

※ 各 2 Byte のデータ形式については Table 2-7-8 参照

Table 2-7-8 : Data format of PIXEL DATA and HK DATA.

PIXEL DATA と HK DATA のデータ形式

Data Type	PIXEL DATA	H/W HK DATA
平均	符号付き固定小数点 (小数点以下は、LIS gain が 0x00 (1.08 倍)の時 3 bit、それ以外は 1 bit)	符号無し固定小数点 (小数点以下は 2 bit)
分散	符号無し固定小数点(小数点以下は 4 bit)	
最大・最小	符号付き整数	符号無し整数

2-8 本分光器の性能

2-8-1 波長ピクセル関係

本分光器の制作後に単体のさまざまな性能評価試験を実施した(安部他, 2002; Abe *et al.*, 2002a)。ここでは波長ピクセル関係の測定についてまとめる。波長ピクセル関係とは、単色の光が分光器に入光した場合に、その光が、検出器のどのピクセル(チャンネル)で検出されるかの関係である。本分光器の波長ピクセル関係を調べるために、モノクロメータの光を、積分球を介して本分光器に入光させて、測定を行った。測定は、分光器の仮組み後から測定を複数回実施した。光学系の仮組み後には、まず観測波長域が検出器の 64 チャンネルに全て納まるように、光学系のアライメントを調整しながら測定を実施し、本組みおよび光学系の固着後は、単体の環境試験(熱真空試験や振動試験)の前後で測定して、大きな変化がないことを確認した。

全体的な波長ピクセル関係の測定結果を Figure 2-8-1 に示す。この図から NIRS の波長ピクセル関係は 1 次関数でよくフィットできることが分かる。

この関数で求められるピクセルごとの対応する波長の光を NIRS に入光させてピクセルの中央に光が照射されているかを確認した結果を Figure 2-8-2~Figure 2-8-9 に示す。S/N を良くする為にモノクロメータの出力波長幅を NIRS の観測波長より少し広い 32nm に設定しているため両端のピクセルにおける出力が見られるが、両端にはみ出た光の出力は中央のピクセルに対して低くほぼ対称になっていることから、Figure 2-8-1 に示した波長ピクセル関係が全ピクセルについて成り立っていることを確認した。

モノクロメータの出力強度と NIRS の各ピクセルの出力の関係から、NIRS の感度特性を求めることも可能であるが、次節で述べる標準ハロゲンランプと標準拡散板を用いた結果の方が十分な S/N が得られたので、その結果について述べる。

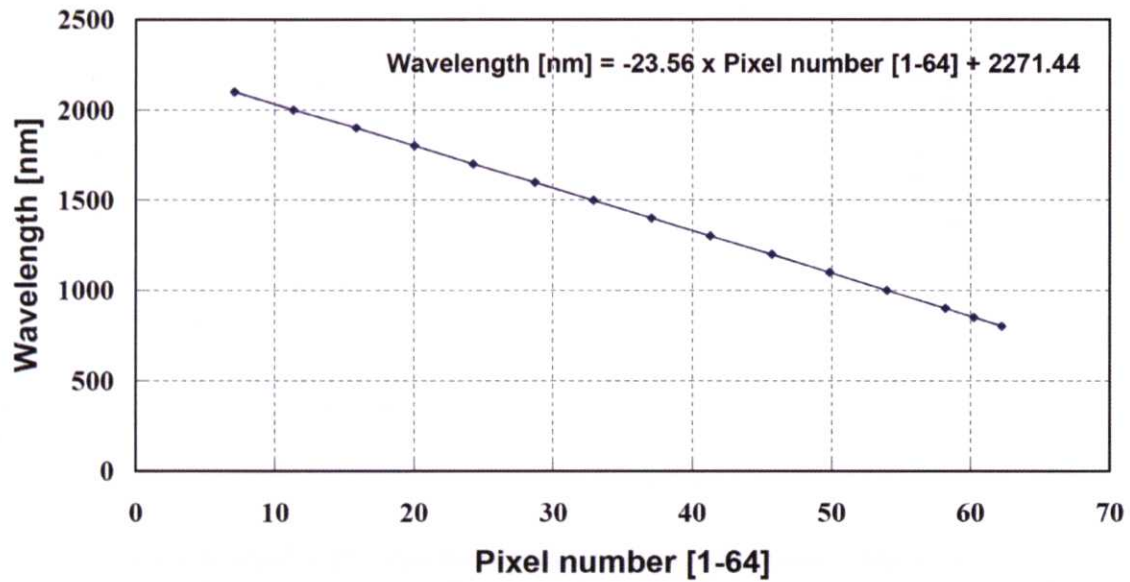


Figure 2-8-1 : Relationship between pixel number and wavelength.
 波長ピクセル関係の測定結果

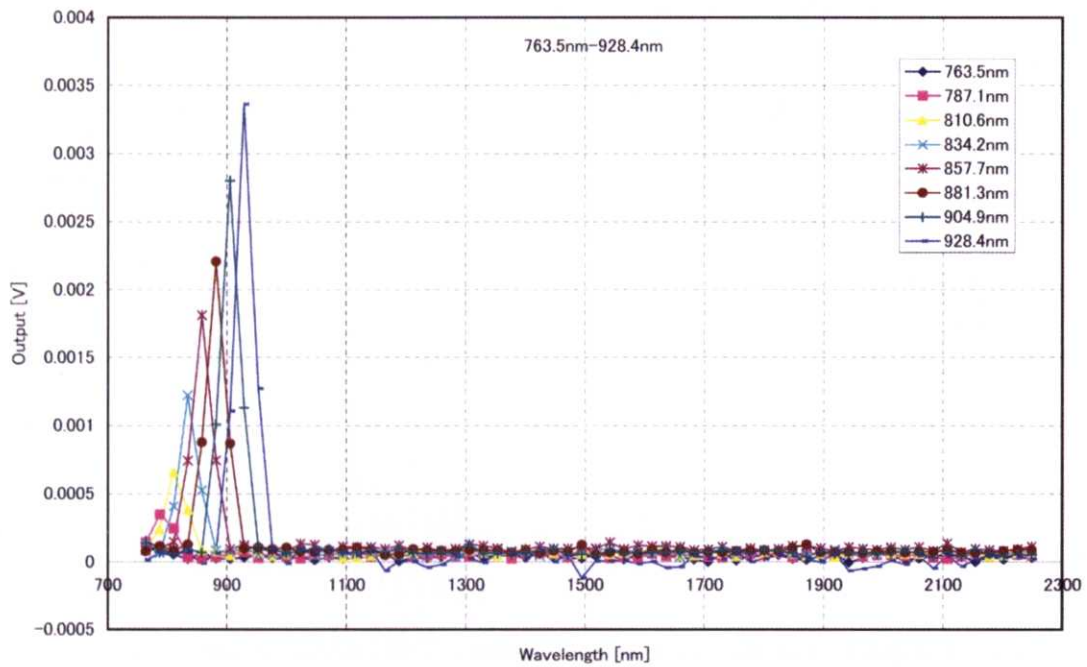


Figure 2-8-2 : Check of center wavelength for each pixel (1 to 8).
 各ピクセルの観測中心波長の確認 (1) 1~8 番目

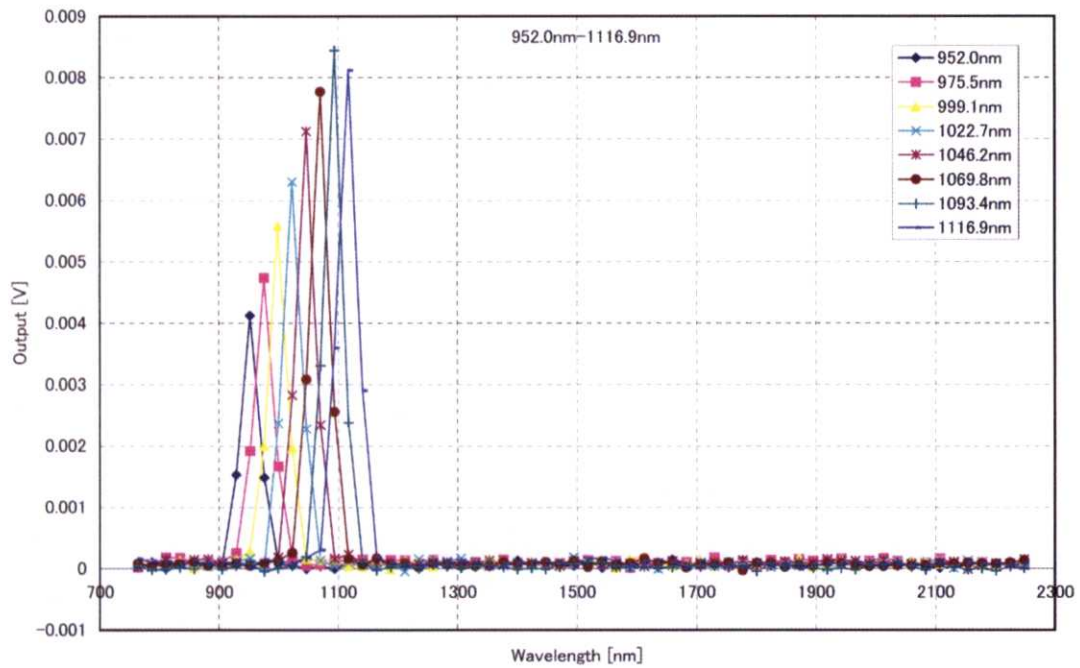


Figure 2-8-3 : Check of center wavelength for each pixel (9 to 16).
各ピクセルの観測中心波長の確認 (2) 9~16 番目

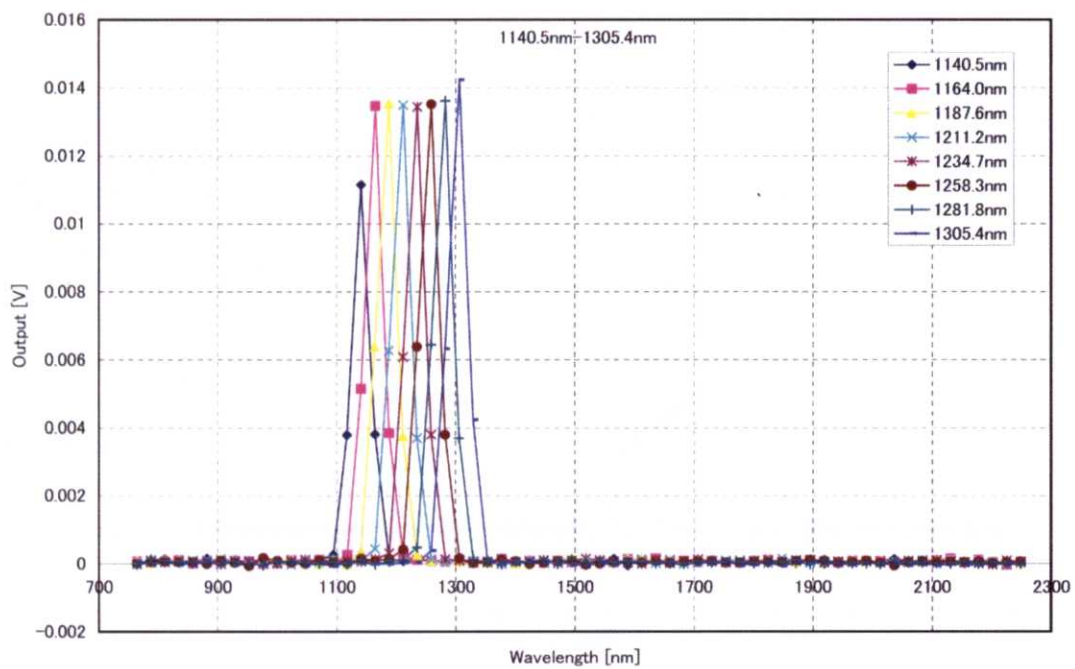


Figure 2-8-4 : Check of center wavelength for each pixel (17 to 24).
各ピクセルの観測中心波長の確認 (3) 17~24 番目

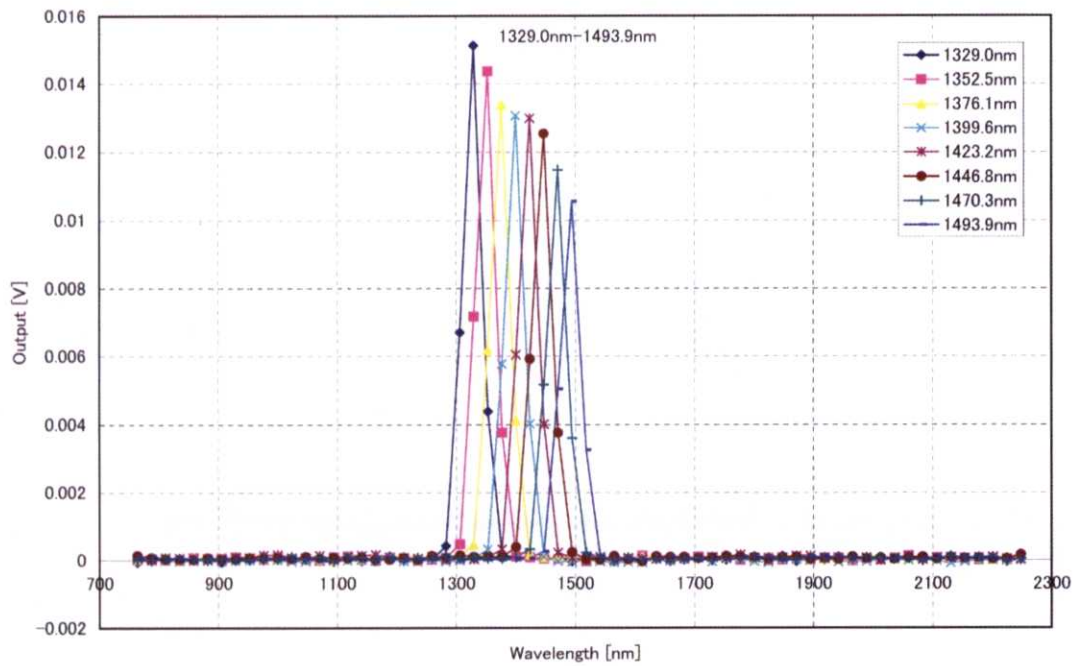


Figure 2-8-5 : Check of center wavelength for each pixel (25 to 32).
各ピクセルの観測中心波長の確認 (4) 25~32 番目

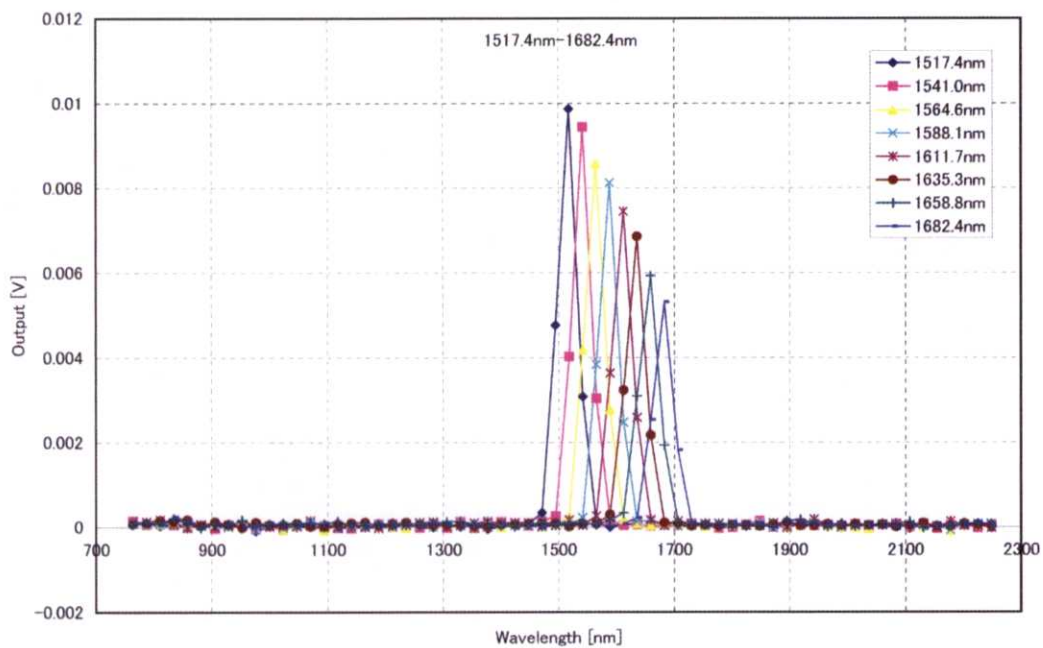


Figure 2-8-6 : Check of center wavelength for each pixel (33 to 40).
各ピクセルの観測中心波長の確認 (5) 33~40 番目

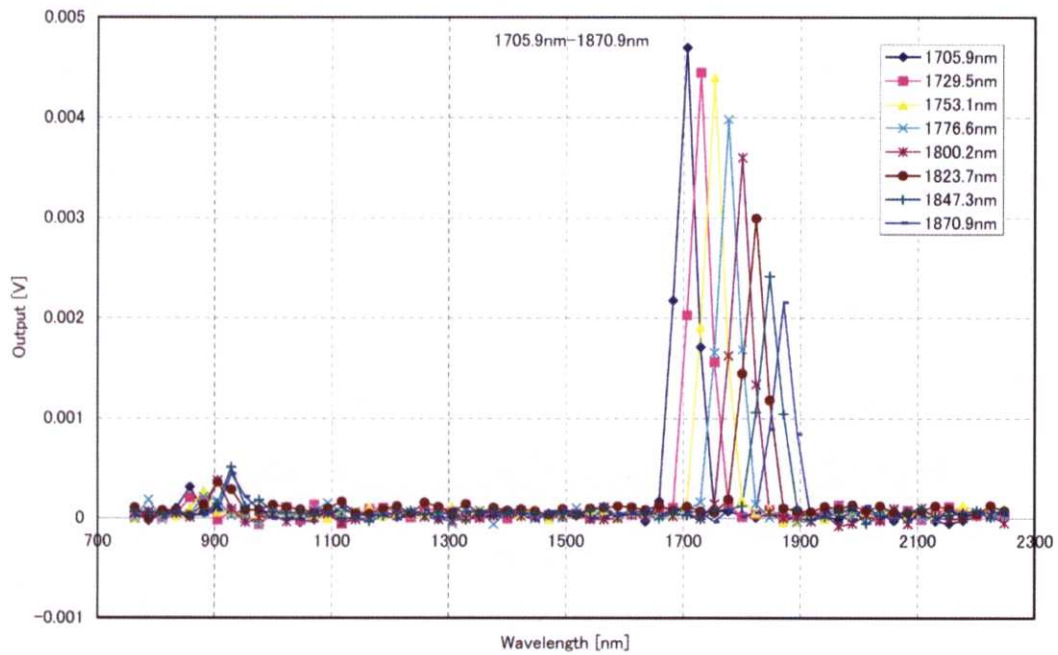


Figure 2-8-7 : Check of center wavelength for each pixel (41 to 48).

各ピクセルの観測中心波長の確認 (6) 41~48 番目(短波長側の出力はモノクロメータからの2次光の漏れ出しで、本分光器のグリズムによる2次光を検出しているわけではない。)

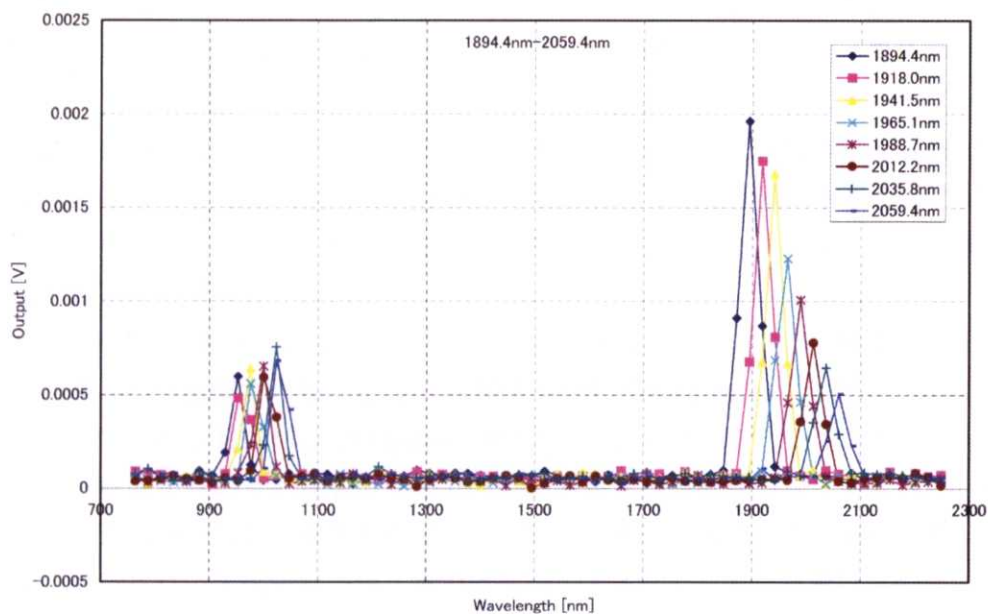


Figure 2-8-8 : Check of center wavelength for each pixel (49 to 54).

各ピクセルの観測中心波長の確認 (7) 49~54 番目(短波長側の出力はモノクロメータからの2次光の漏れ出しで、本分光器のグリズムによる2次光を検出しているわけではない。)

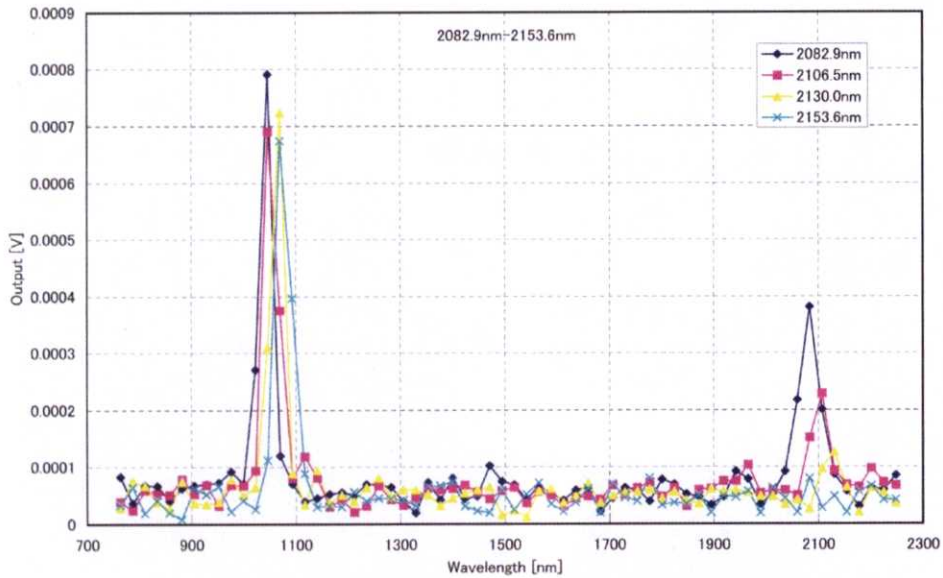


Figure 2-8-9 : Check of center wavelength for each pixel (55 to 59).

各ピクセルの観測中心波長の確認 (8) 55~59 番目(短波長側の出力はモノクロメータからの2次光の漏れ出しで、本分光器のグリズムによる2次光を検出しているわけではない。)

2-8-2 感度特性

本分光器の感度特性の測定も、光学系の仮組み後から環境試験の前後を含めて複数回にわたって実施した。測定方法は、モノクロメータと積分球を用いる方法、黒体炉を用いる方法、標準ランプと、標準拡散板を用いる方法の3種類の方法で測定した。モノクロメータと積分球を用いる方法は、分光器に入射する光の量が弱く、十分なS/Nが確保できないこと、黒体炉はS/Nとしては十分であるが、光源の面積が本分光器の有効径サイズより小さいものしか用意できなかったため、測定は参考値とし、標準ハロゲンランプと標準拡散板による測定結果を採用した。

測定は、分光器から距離100 cmの地点の正面に大きさ5インチ四方の標準拡散板を置き、そこに入射角30度(法線を0度と定義)で照射する位置で距離50 cmの地点に標準ハロゲンランプを置いて点灯させて行った(Figure 2-8-10 参照)。またハロゲンランプからの直接光や床面および壁面からの1回反射の光が分光器に入射する量を極力なくすように、注意を払った。また測定時の気温と湿度も測定し、光路中の大気(水蒸気や二酸化炭素)による吸収の補正を行った。大気吸収の補正量の計算は、アメリカ空軍地球物理学研究所によって開発された放射伝達コード(MODTRAN)を用いて行った[3]。

環境試験の前後では大きな感度特性の変化はなかった。最終的に得られた感度特性をFigure 2-8-11に示す。この感度特性の形は、Figure 2-3-11で示したグリズムの効率とFigure 2-3-17で示した検出器の感度特性の積の形でほぼ説明できる。

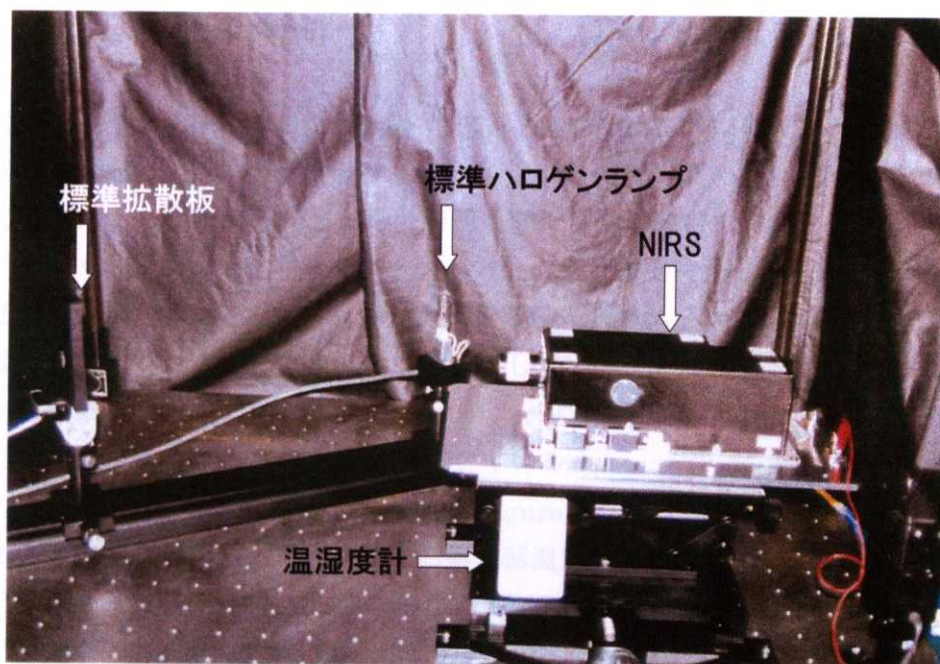


Figure 2-8-10 : Configuration at responsivity test.

感度特性の試験コンフィグレーション。実際の測定の際には試験台表面での反射の影響を抑えるために低反射率のシートをおき、ハロゲンランプの直接光が NIRS に入光しないように間に仕切板を設置して試験を実施した。

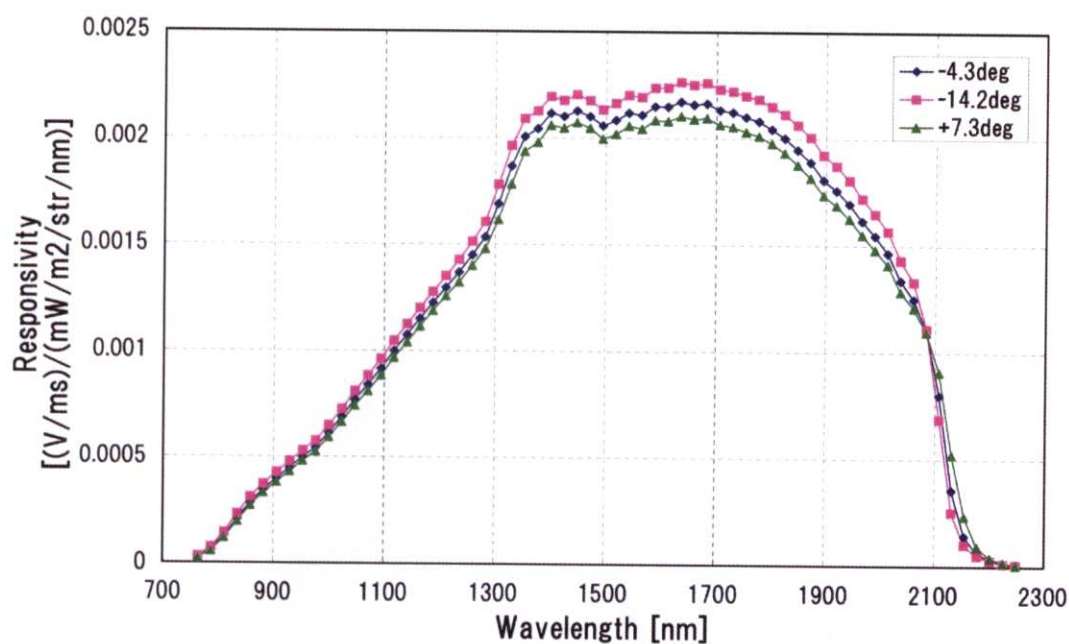


Figure 2-8-11 : Responsivity of NIRS-S.

最終的に得られた分光器の感度特性。検出器温度は-14.3℃(ピンク)、-4.3℃(青)、+7.3℃(緑)。

2-8-3 リニアリティー特性

感度のリニアリティー特性の試験結果を Figure 2-8-12 に示す。暗出力の増加による出力の飽和を避けるために、検出器温度は -14°C の条件で測定を行なった。感度のリニアリティー特性の測定は、一定輝度の光源を積分時間を変化させて測定する方法と、一定輝度の光源のアーチャサイズを変化させて測定する方法の2通りで実施した。Figure 2-8-12 は前者の方法で測定した結果である。グラフの傾きは分光器の各ピクセルの感度の違いである。傾きが緩やかなピクセルは感度が低いことを表している。感度が低いピクセルはリニアリティーが悪い傾向があるが、 2100 nm 以下の観測波長域について、出力の飽和レベル(約 1.6 V)まで 10% 以内のリニアリティーが確認できている。

暗出力のリニアリティー特性の試験結果を Figure 2-8-13 に示す。暗出力の特性をみるために暗出力が飽和しない範囲で大きくなる検出器温度 $+7^{\circ}\text{C}$ の条件で測定を行なった。暗出力のリニアリティーは積分時間を変えて取得したものである。

リニアリティーの試験の結果から、明出力の飽和レベルは約 1.6 V である。暗出力差し引き後の出力の飽和レベルの目安を Table 2-8-1 に示す。この表から検出器の温度は 0°C 以上になると暗出力の増加によって、明出力のダイナミックレンジが狭くなることがわかる。検出器温度が 0°C 以上では、暗出力が低い場合でリニアリティーが確認できた 1.6 V 程度より低い出力電圧で出力が飽和している。一方検出器温度が -20°C 以下では、暗出力が十分低いため、明出力のダイナミックレンジは低温にしてもそれほど大きくならないことも分かる。

以上のことから、2-3章および2-4章で議論した結果とあわせて、小惑星イトカワの観測時の検出器温度は $-10^{\circ}\text{C}\sim-20^{\circ}\text{C}$ 付近とするのが適当であると考えられる。

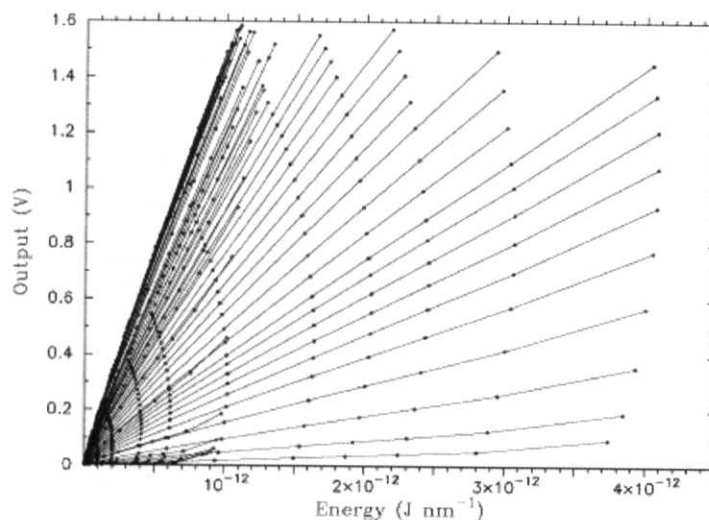


Figure 2-8-12: Linearity of response.

リニアリティー特性 (1ch - 64ch, LIS 温度 -14°C)

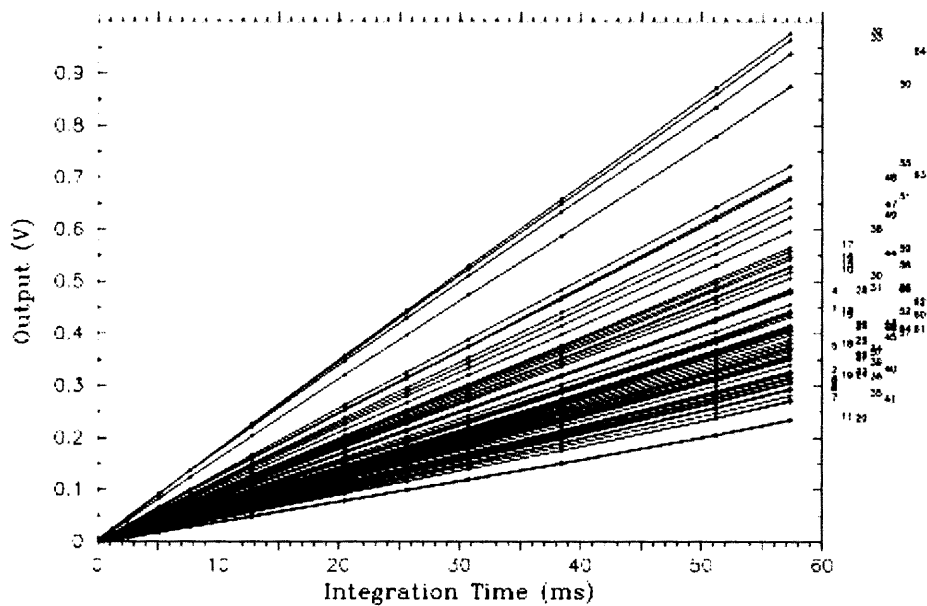


Figure 2-8-13: Linearity of dark output.

暗出力のリニアリティー特性 (1ch - 64ch, LIS 温度+7℃)。図右の数字はピクセル番号。

Table 2-8-1: Saturation level of an output.

出力の飽和レベルの目安

LIS 温度	出力の飽和レベルの目安
15 °C	0.00(1.36) V
10 °C	0.60(1.51) V
0 °C	1.27(1.67) V
-10 °C	1.57(1.75) V
-20 °C	1.70(1.78) V
-30 °C	1.76(1.79) V
-40 °C	1.78(1.80) V

- ※ 複数の LIS 温度での測定結果から求めた明暗差し引きデータのリニアリティー上限値は約 1.6 V である。
- ※ 各温度での明出力のリニアリティー範囲は暗出力レベルで決まるものとし、暗出力が最も大きなピクセル(32ch=0.977 V)から求まる値をリニアリティー保障範囲とした。また、括弧内は、暗出力が最も小さなピクセル(20ch=0.234 V)から予想されるリニアリティー保障範囲である。

2-8-4 アライメント

本分光器の視線方向と探査機の座標系とを結びつけるために、本分光器にアライメントキューブを取り付け、オートコリメータを用いて、NIRS の視線方向と NIRS 本体に取り付けたアライメントキューブの法線との関係を求めた。分光器を探査機に取り付けたあとは、探査機に取り付けたアライメントキューブと、NIRS に取り付けたアライメントキューブの関係を、オートコリメータを用いて測定し、NIRS の視線方向と探査機座標系の関係を取得した。他の観測機器や姿勢系センサも同様の測定を行うことによって、観測機器同士のアライメントデータも取得することができた。

なお、高度計(LIDAR)の送信光(1064nm の波長)の小惑星表面での反射を本分光器で測定することで、NIRS の波長較正や、お互いのアライメントの確認ができるため、LIDAR の送信光の光軸と NIRS の視線方向を合わせるよう、高度計の取り付けの際に、0.01 度の精度で取り付け角の調整を行った。

本分光器光軸と探査機座標系との関係を Figure 2-8-14 に示す。

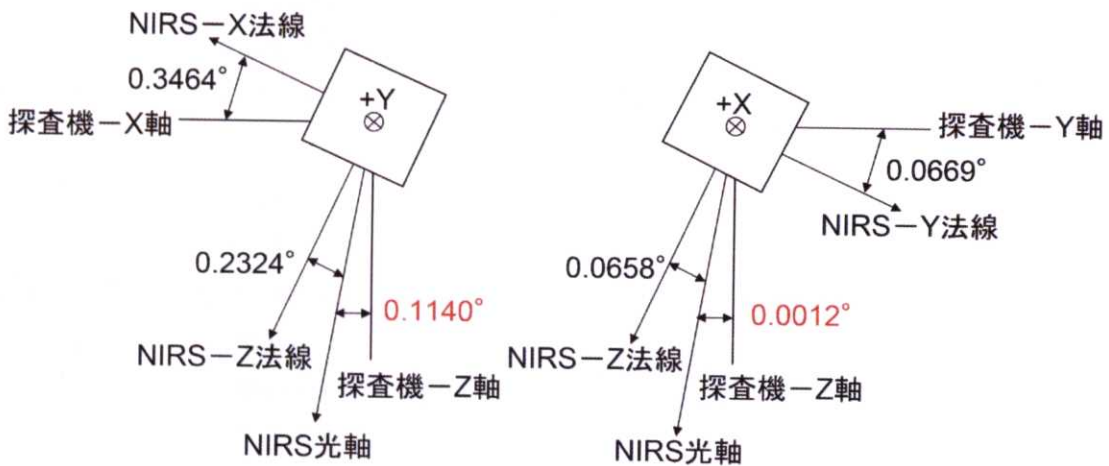


Figure 2-8-14 : Relation between the optic axis of the spectrometer and the spacecraft coordinate system.

本分光器の光軸と探査機座標系との関係

第3章 打ち上げ後小惑星到着までの運用

3-1 小惑星到着までの運用概要

本分光器に関する運用としては、打ち上げ後、小惑星到着までのクルージング中に以下のような内容のオペレーションを実施した。1、基本動作チェック、2、機器アライメントチェック、3、恒星・惑星観測、4、地球・月観測、5、搭載ランプ・LED モニタ。第3章ではそれぞれの結果について述べる。

Table 3-1-1 に打ち上げ後小惑星到着までの運用履歴をまとめる。表中の Cal.data は搭載ランプ・LED データの取得実施である。

Appendix 3 に小惑星到着までの運用中に行った観測の観測パラメータ一覧を示す。

Table 3-1-1 : Operational history after launch before arrival at the asteroid.

打ち上げ後小惑星までの運用履歴

[2003年]	
5月9日	打ち上げ
5月12日	初期動作チェック1、Cal.data
5月16日	初期動作チェック2、Cal.data
5月23日	アライメントチェック1、αSco
6月5日	アライメントチェック2、Cal.data, αSco
8月3日	Cal.data
9月8日	Cal.data
10月28日	Cal.data
11月11日	Mars
11月18日	Mars
11月24日	Cal.data
12月24日	Cal.data
12月30日	Cal.data
[2004年]	
1月6日	アライメントチェック3、αAur, αOri, Saturn
1月13日	アライメントチェック4
2月9日	Cal.data
3月9日	Cal.data, Jupiter
4月7日	Cal.data
5月15日	Cal.data
5月16日	Moon, Earth

5月17日	Moon
5月18日	Earth
5月19日	地球スイングバイ
6月1日	α Sco
7月17日	Cal.data
9月6日	Cal.data
9月7日	Cal.data
9月8日	Cal.data
11月30日	Cal.data
[2005年]	
1月5日	Cal.data
3月29日	Cal.data
4月26日	Cal.data
4月27日	Cal.data
5月9日	α Ori
6月1日	Cal.data
6月26日	Saturn
8月31日	Cal.data
9月4日	Cal.data

3-2 基本動作チェック

NIRSの基本動作チェックは打ち上げ3日後の2003年5月12日および16日に実施した。機器のON/OFF,ペルチエクーラーの動作、シャッターの動作、搭載ランプ・LEDの動作ともに問題ないことを確認した。

Figure 3-2-1に打ち上げ後(5月16日)に取得したLEDのスペクトルデータと打ち上げ前の熱真空試験時に同じ温度条件で取得した同様のデータを示す。LEDデータのピーク位置は打ち上げ前のデータと同じ位置にあり、打ち上げ前後で光学系の波長ピクセル関係に変化がなかったことを確認した。Figure 2-3-19のLEDデータとスペクトルの形が違うのは、Figure 2-3-19はLED単体をNIRSの視線中心に置いて測定したのに対して、Figure 3-2-1はLEDを視野範囲外の視野絞りの端に取り付けて測定しているためである。打ち上げ後の波長ピクセル関係のモニタはこのLEDスペクトルのピーク位置の変化をモニタすることで行った。

LEDデータはLEDの取り付けが視野範囲外にあるため、検出器に届く光量が少なく、積分設定範囲の上限に近い51.2 msecにしても、ピークレベルで20 mV弱である。またNIRSの出力は積分時間が長いと、シャッターのOpen/Closeの状態の違いによるバイアスレベルの微妙な違いによるものと思われる暗出力の違いにより、明暗信号を差し引きすると、入光のないピクセルの出力がマイナスレベルになっているのが分かる(Figure 3-2-1)。この現象はさまざまな条件(積分時間や温度など)で変化することはわかっているが原因は特定できていない。ただし、この変動のレベルは約1 mV弱のレベルであり、小惑星観測時のフラックスによる出力に比べると十分小さい。

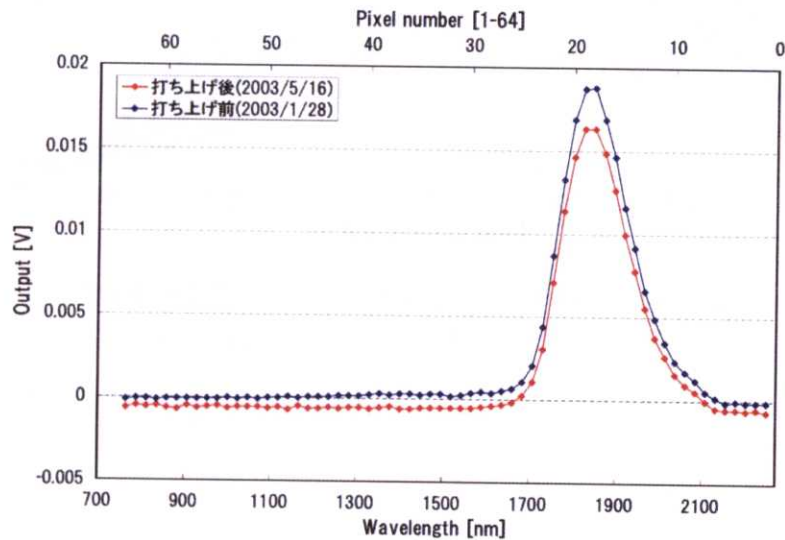


Figure 3-2-1 : LED data obtained before(blue) and after(red) the launch. 打ち上げ前後に得られたLEDデータ。打ち上げ前(青)、打ち上げ直後(赤)。

Figure 3-2-2 に打ち上げ後（5月16日）に取得した搭載ランプのスペクトルデータを示す。積分時間を 13.1 msec から 57.3 msec まで 5 段階変えて、出力のリニアリティについても確認した（Figure 3-2-3 参照）。Figure 3-2-4 に打ち上げ前後のランプデータの比較結果を示す。打ち上げ前に比べて打ち上げ後の出力レベルは数%下がっているが、Lamp スペクトルの形はほぼ同じである。相対的な変化を 1565 nm で規格化した結果を Figure 3-2-5 に示す。観測波長範囲で±2%以内の変動にとどまっており問題ない結果が得られた（安部他, 2003）。2100 nm より長い波長域で打ち上げ前後の変化が大きいように見えるが、これは検出器の感度が低い波長域で、ランプデータの出力の絶対値が低いためである。2100 nm より長い波長については NIRS の観測波長域外であるので、感度モニタの精度が悪くても問題はない。ランプデータについては、25.6 msec のデータをノミナルとして、打ち上げ後の感度特性のモニタとして、定期的（1~2 ヶ月ごと）にデータ取得を行った。

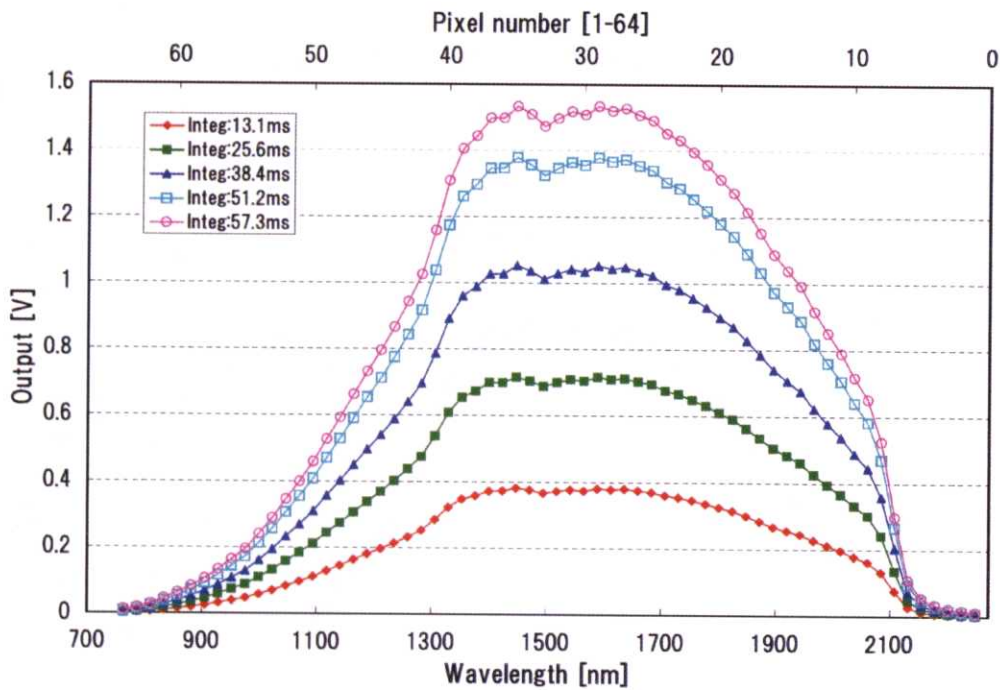


Figure 3-2-2: Lamp data obtained after the launch.

打ち上げ直後に得られたランプデータ

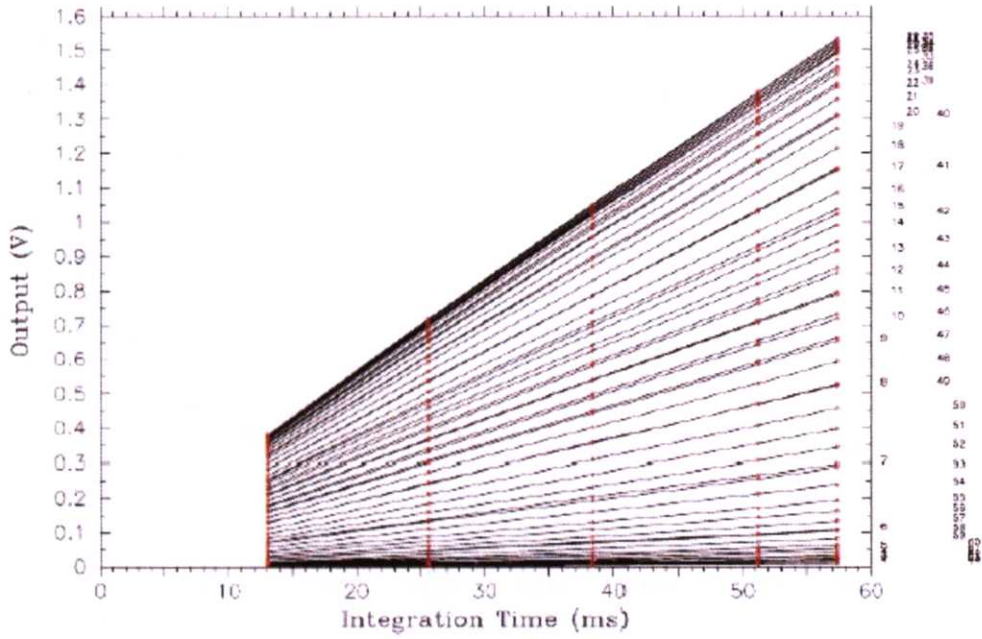


Figure 3-2-3: The check of linearity.

リニアリティーの確認。図右の数字はピクセル番号。

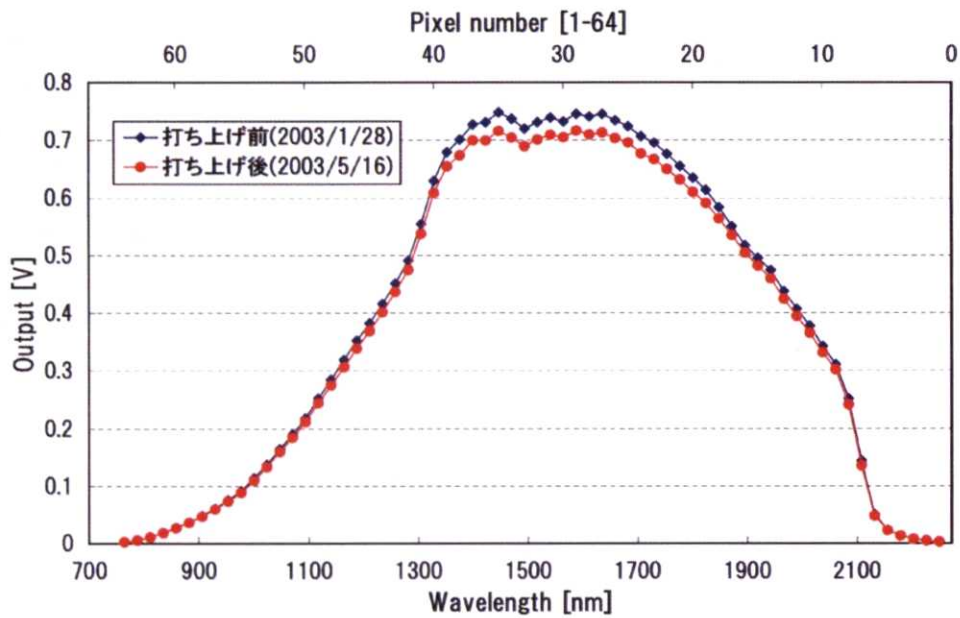


Figure 3-2-4: Comparison of the lamp data before(blue) and after(red) the launch.

打ち上げ前後のランプデータの比較。打ち上げ前(青)、打ち上げ後(赤)。

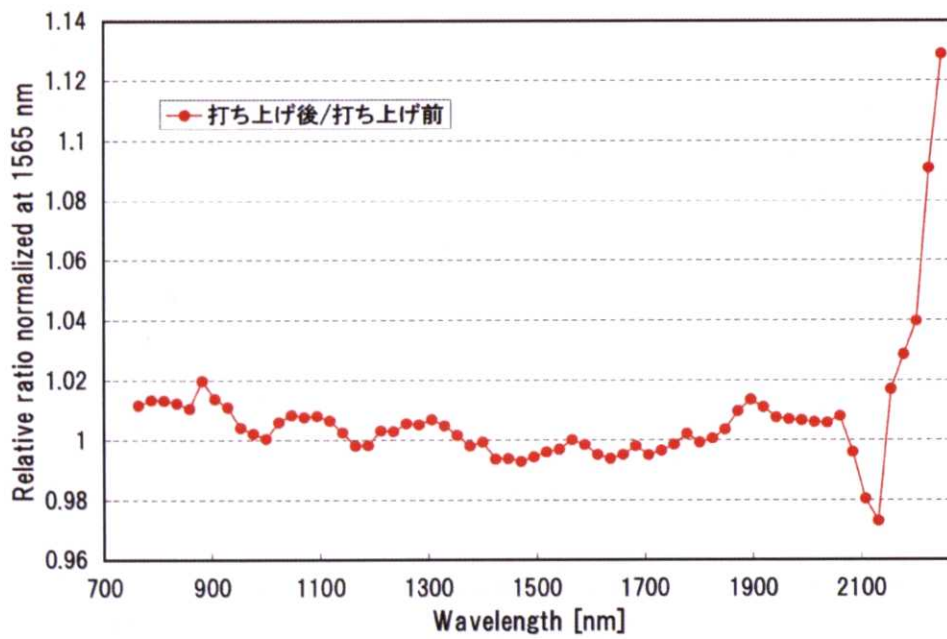


Figure 3-2-5: Comparison of the lamp data before and after the launch.
 打ち上げ前後のランプデータの比較

3-3 機器アライメントチェック

2003年5月23日および6月5日に α Sco(さそり座の1等星アンタレス)を用いて NIRS の機器アライメントチェックを実施した。NIRS の視線方向(探査機のほぼ-Z 軸方向)を α Sco の方向に向け、連続観測を実施しながら、探査機の姿勢を2次的に X 軸周り、Y 軸周りにスキャンさせることによりアライメントを確認した (Figure 3-3-1)。図の青い線が NIRS の視線方向の履歴で、青い点が連続観測中の積分中央時刻での視線方向である。赤い点および線が NIRS の取得データに α Sco のスペクトルが検出されたものであり、赤い線を囲う 0.1 度四方の四角が NIRS の視野であると考えられる。スキャンの中心を緑で、NIRS の視野の中心を紫で表した。

得られた NIRS の視線方向のアライメントは探査機の-Z 方向に対して、+X 軸周りに 0.0012deg、+Y 軸周りに 0.1140deg 回転させた方向に向いており(つまり探査機の-Z 方向を対象天体に向けてから+X 軸周りに-0.0012deg、+Y 軸周りに-0.1140deg 回転させると、NIRS の視線方向に対象天体が入る)、この結果は打ち上げ前のアライメントチェックで得られた結果と同じであった。

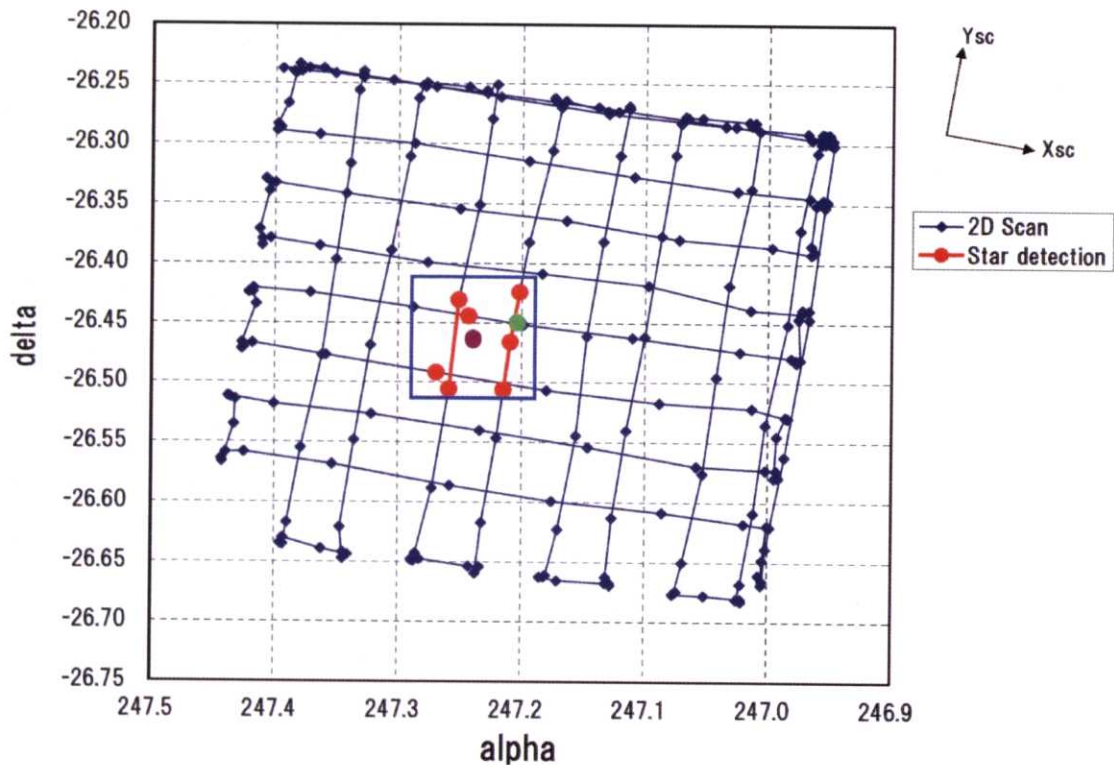


Figure 3-3-1: Alignment check of NIRS using α Sco.

α Sco を用いた NIRS の機器アライメントチェック

また、2004年1月6日には α Aur（ぎょしゃ座の1等星カペラ）をAMICAと同時に観測し、AMICAとの相互アライメントを測定した。その結果、NIRSが恒星をポインティングしている際のAMICAのCCD上での検出アドレスは（492, 507）であった。AMICAのCCD上で探査機の-Z方向のアドレスは(491,527)で、(H,V)のHアドレス増加方向がX軸周り、Vアドレスの減少方向がY軸周りの回転に対応する。この結果から推定されるNIRSの視線方向のアライメントは、探査機の-Z方向に対して、+X軸周りに0.0055deg、+Y軸周りに0.1111deg回転させた方向に向いており、上記の結果ともよく一致する。

3-4 恒星・惑星観測

恒星観測は、これまで α Sco (2004年6月5日実施) の他に α Ori (2004年1月6日実施)、 α Aur (2004年1月6日実施) などを観測した (安部他, 2004; Abe *et al.*, 2004a)。恒星観測の結果として最初に観測した α Sco の観測結果を示す。本分光器で得られる出力は、NIRS の検出器が検出した各ピクセルの出力値であり、その結果を Figure 3-4-1 に示す。

NIRS の出力値を α Sco からのフラックスに直すには、NIRS の出力値を NIRS の感度特性で割り算すればよい、しかし、 α Sco の観測は点光源の観測であり、打ち上げ前に取得した感度特性データは面光源の測定から求めたものである。そこで面光源の感度特性に NIRS の視野サイズ (観測立体角) で規格化したものを点光源感度 (Figure 3-4-2) として用いる。

Figure 3-4-3 に本分光器で得られた α Sco のスペクトルを示す。比較のために、地上観測による α Sco の絶対測光の結果 (JHK バンド) (Gezari *et al.*, 1984) を示すが、絶対値でよく一致する。また α Sco と同じ M1 型の恒星のスペクトル (Lançon and Wood, 2000) を J バンドで規格化して表示した結果を合わせて示すが、1100 nm や 1400 nm の H₂O の吸収バンドや相対的なスペクトルのプロファイルも一致していることが確認できる。

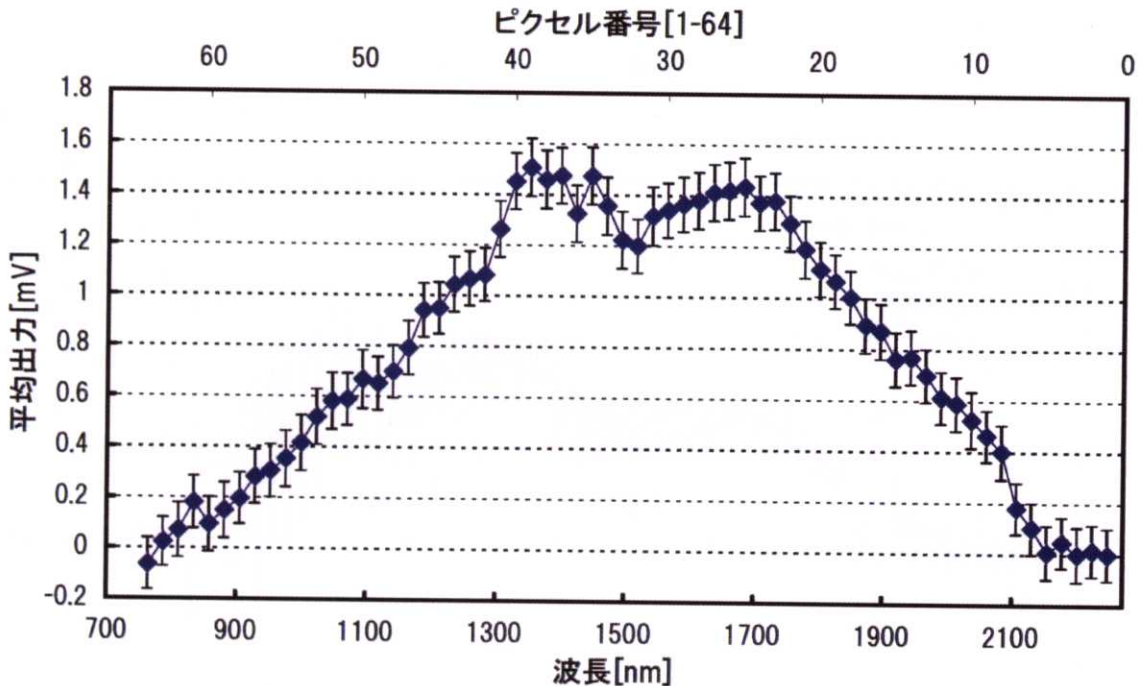


Figure 3-4-1 : Observed output of α Sco by NIRS.

α Sco の観測結果 (NIRS の出力値)

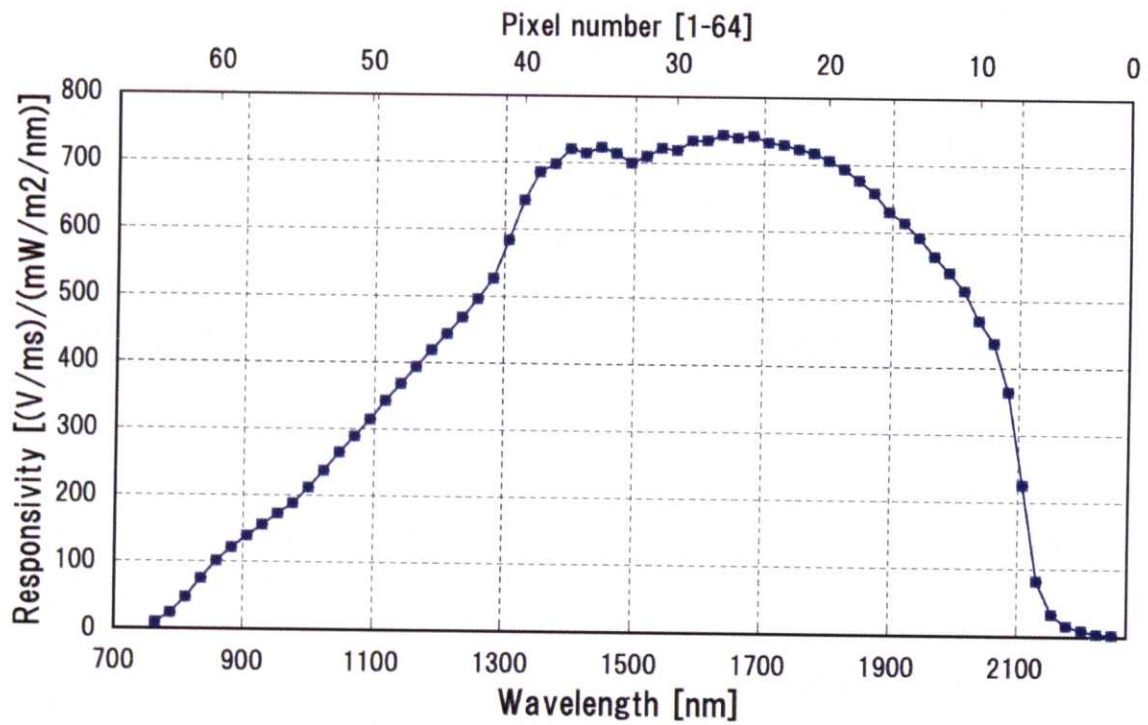


Figure 3-4-2: Point light source sensitivity of this spectrometer.

本分光器の点光源感度

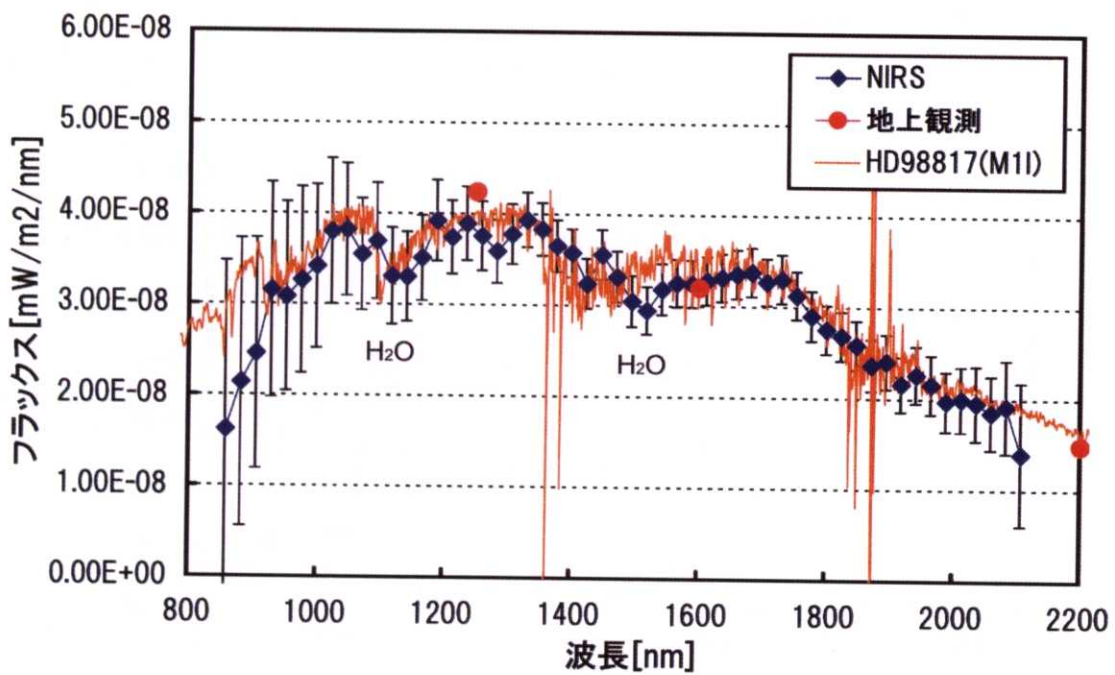


Figure 3-4-3: Flux spectrum of α Sco obtained by NIRS.

NIRS で得られた α Sco のスペクトル

惑星については、火星（2003年11月11日および18日実施）、木星（2004年3月9日実施）、土星（2004年1月6日実施）の観測を実施した。惑星観測の結果として、木星からのフラックススペクトル（Figure 3-4-4）を示す。惑星からのフラックスは太陽からの光を反射しているため、NIRS で得られたフラックスを、太陽のフラックスで割り算することにより、反射スペクトルを得ることができる。Figure 3-4-5 に本研究で用いた太陽フラックスのスペクトルを示す。太陽フラックスデータは MODTRAN に使われている Kurucz (1995) のデータを採用した[4]。

木星の観測はアライメントチェックで求めたアライメント情報をもとに、NIRS の視野内に木星が完全に入る姿勢に約 20 分間姿勢を維持して行っている。姿勢固定観測の前に 2 次元スキャン観測も実施してその際のピークレベルも確認し、姿勢固定観測の時のレベルと同じであることを確認している。木星観測時の 1 回の積分時間は 57.344 msec で 512 回分をスタックして 1 データとし、18 データ連続で取得したものを平均化した結果を図に示した。約 20 分間の観測時間のうち実効的な積分時間は約 528 秒である。

Figure 3-4-6 に本分光器で得られた木星の反射スペクトルを示す。図の縦軸は Radiance Factor と呼ばれる反射率で、同じ断面積のランベルト面を持つ表面からフラックスに対する、観測されたフラックスの比であり、 r_f や I/F と表現されることが多い（詳しい定義は Klassen and Bell (2003) 参照）。比較のために、地上観測で得られた木星のスペクトル（Clark and McCord, 1979）も合わせて示した。観測波長域の短波長側では、地上観測とのずれが大きいだが、それ以外については、NIRS で得られた結果は地上観測によって得られている反射スペクトルと絶対値も含めてよく一致していることがわかる。NIRS のスペクトルからも木星大気メタンやアンモニアの吸収が検出できる。

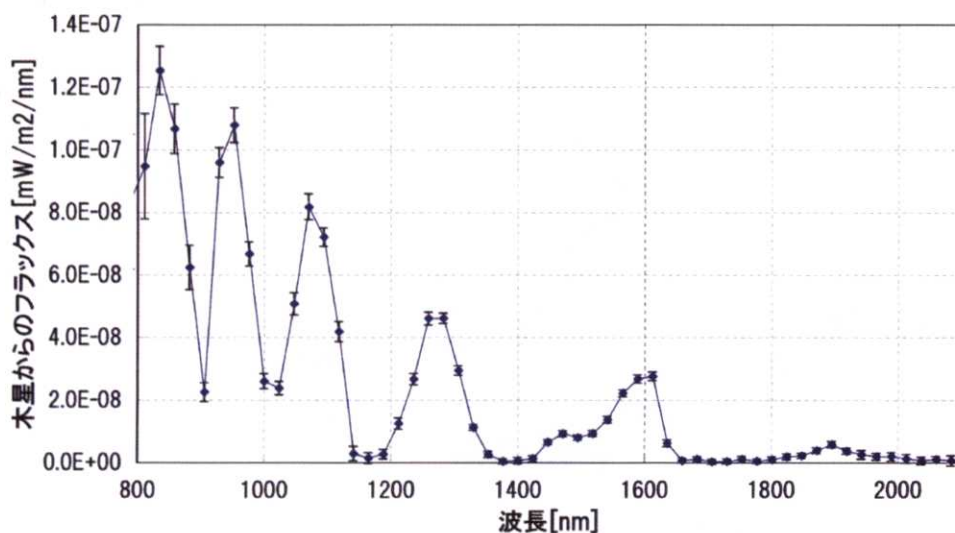


Figure 3-4-4 : Flux spectrum of Jupiter obtained by NIRS.

本分光器で観測した木星からのフラックス

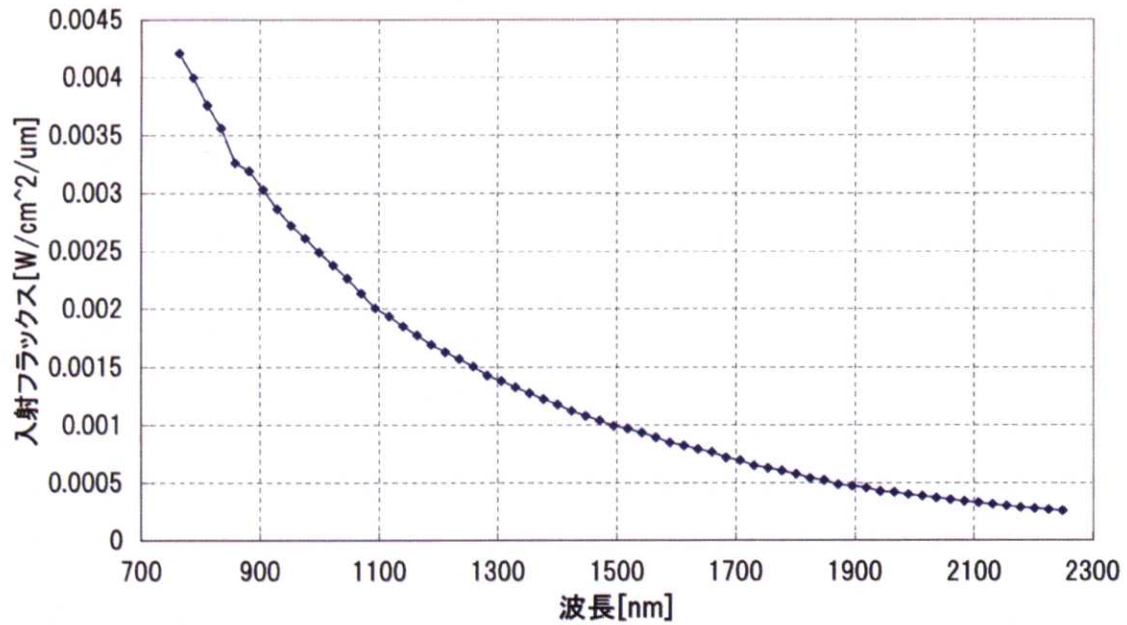


Figure 3-4-5 : Solar incidence flux into Jupiter at the time of the Jupiter observation by NIRS.

木星観測時の、木星における太陽光入射フラックス。太陽からの距離 $8.11 \times 10^8 \text{ km}$ での値。

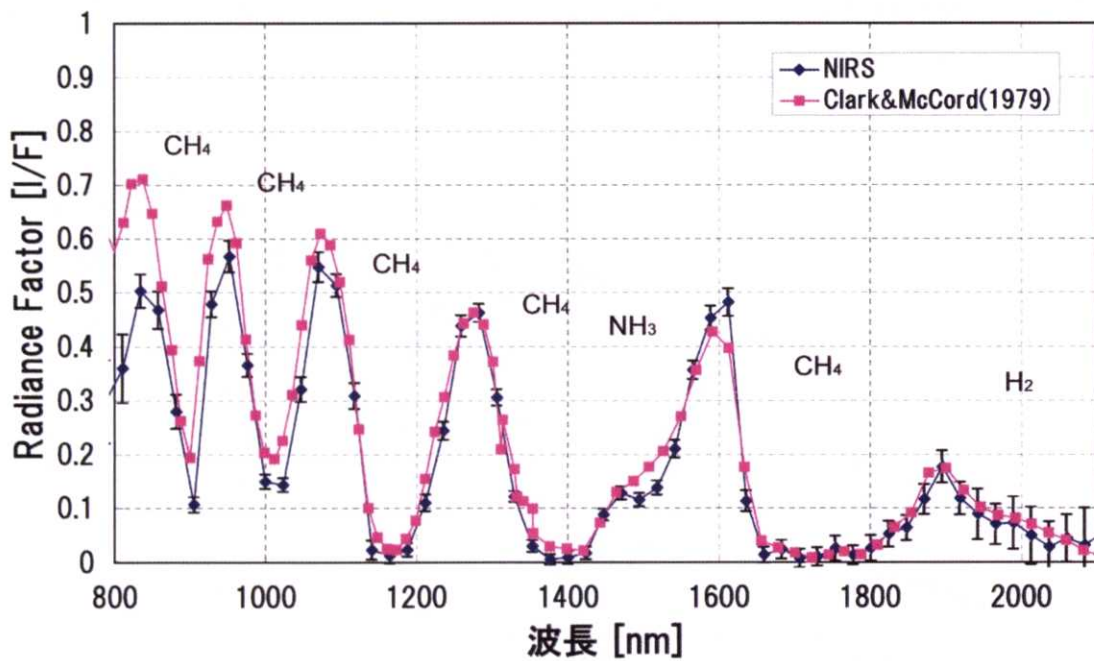


Figure 3-4-6 : Reflectance spectrum of Jupiter obtained by NIRS.

本分光器で得られた木星の反射スペクトル

3-5 地球・月観測

2004年5月19日の地球スイングバイの直前の5月16日から3日間、NIRSは地球および月の観測を実施した(Abe *et al.*, 2004b, 2005)。NIRSで得られた地球の反射スペクトルをFigure 3-5-1に示す。地球の大気の水の吸収がはっきりと検出できることがわかる。点光源の観測では、長時間の積分データをスタックする必要があったが、今回は初めての面光源の観測で、S/N的にも十分な観測であり、1回のシャッター周期での積分時間を6.4 msecにし、64回スタック(測定時間約8秒)でデータ取得している。

月の観測は、探査機の姿勢をFigure 3-5-2に示すように1次元スキャンさせながら、探査機と月の相対的な位置関係の変化とあわせて、月面を2次元的にスキャンして観測を実施した。姿勢スキャンの幅を観測時の月の視直径より少し大きくさせることにより、NIRSの視線方向が月から外れる時刻を調べ、NIRSのアライメントや探査機の軌道データなどを用いてのフットプリント計算の妥当性も検証した。

NIRSで得られた最大出力の時間変化をFigure 3-5-3に示す。スキャンは月表面の太陽光が照射されている側から行われたため、スキャンごとの最大出力は急激に増加した後、ターミネータ側にスキャン領域が進むにつれて、徐々に下がる傾向となっている。Figure 3-5-4には探査機の軌道データ、探査機の姿勢データ、月の暦、NIRSのアライメント情報などをインプットして、計算をしたNIRSのフットプリント履歴を示す。フットプリントの計算はJPLのNAIF(Navigation Ancillary Information Facility)が確立したSPICE systemを用いて行った[5]。

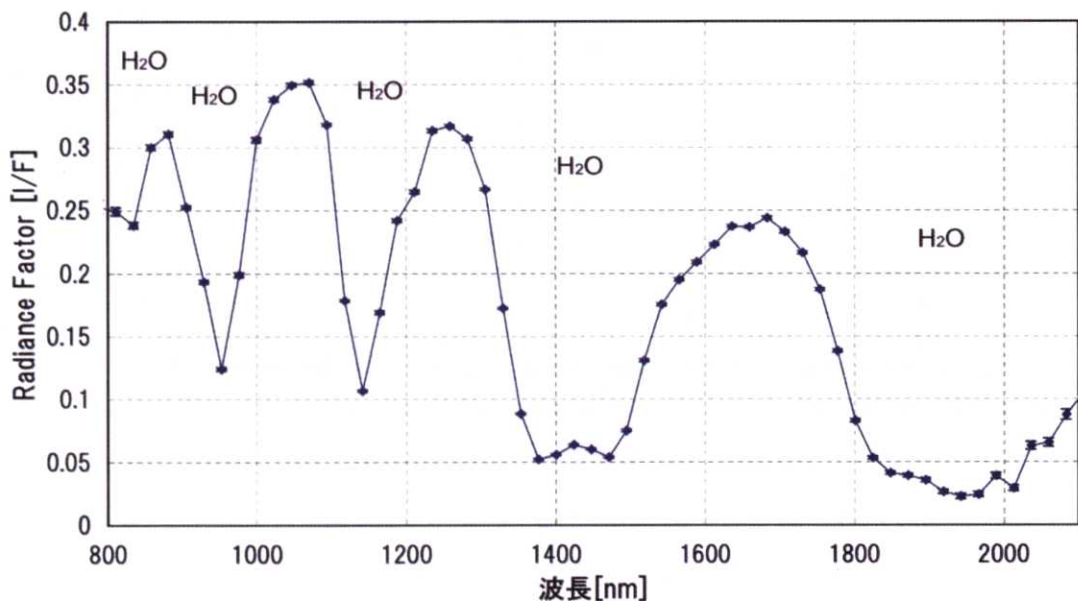


Figure 3-5-1 : Reflectance spectrum of the earth observed by NIRS.

NIRSで観測した地球の反射スペクトル

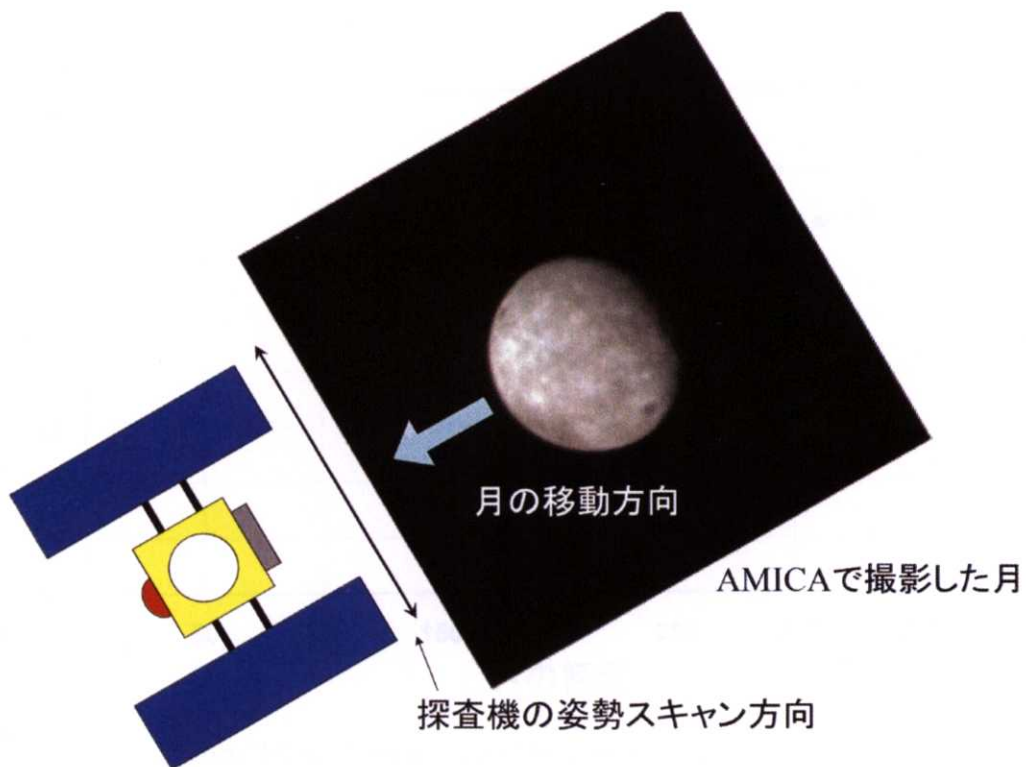


Figure 3-5-2 : Scanning method at the time of moon observation.

月観測の時のスキャン方法

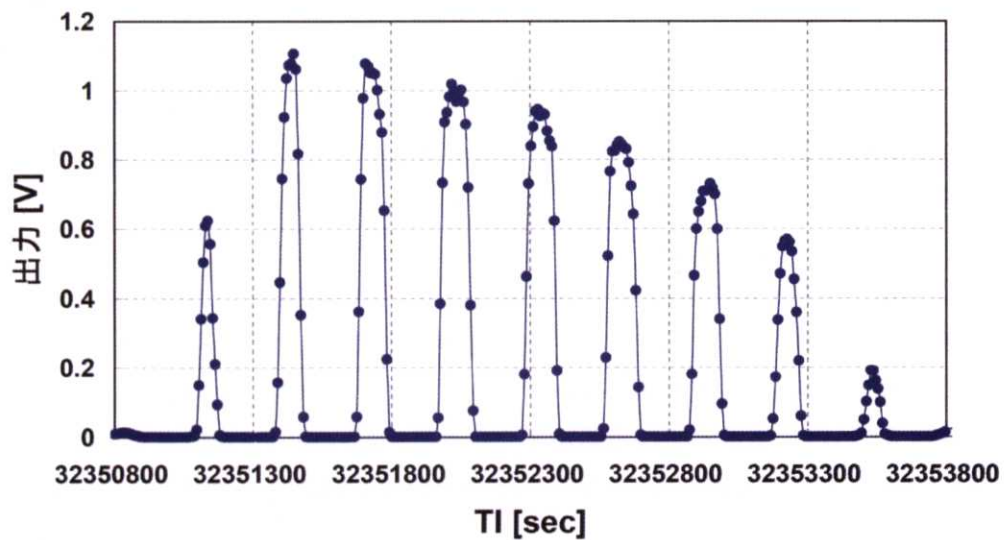


Figure 3-5-3 : Change of the maximum output value of NIRS as a function of time at the moon scan observation. Horizontal axis is the time from that after the power supply injection just before the launch.

月スキャン観測時の NIRS の最大出力値の時間変化。図の横軸は、探査機打ち上げ直前の電源投入後のからの積算時刻。

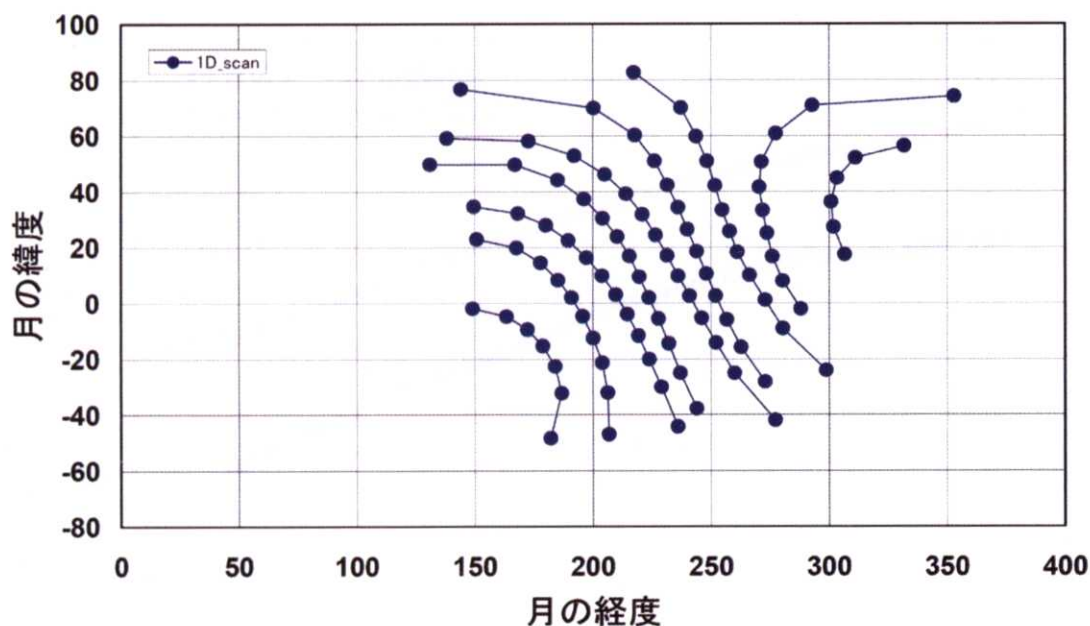


Figure 3-5-4 : Footprint at the moon scan observation.

月スキャン観測時のフットプリント履歴

図を見ても分かるように、NIRSで観測した領域は主に月の裏側にあたる。Figure 3-5-5にNIRSで取得した月のスペクトルを示す。このスペクトルは月の経度231.29度、緯度17.11度を中心とする領域で、太陽光入射角31.74度(法線を0度と定義)、射出角5.04度、太陽位相角30.26度の条件で観測したときのデータである。

本分光器で観測した領域と一致する場所の近赤外域のスペクトルはこれまでの他の観測では得ることができていないが、月の裏側のほとんどは高地と呼ばれる斜長石を多く含む地質区分であることが分かっている。月の高地のサンプルは表側ではあるが、アポロ16号サイトのサンプルのスペクトルが得られているので、合わせて表示する。示したサンプルはAP62231で、スペクトル測定条件は入射角30度、射出角0度、位相角30度である(Pieters, 1999)。アポロ16号サイトのサンプルのスペクトルと比較すると、NIRSで観測した領域のスペクトルは反射率が低く、赤い傾向があり、宇宙風化の進行度がアポロ16号サイトより高い可能性がある。しかし、詳細は来年打ち上げ予定のSELENEによる観測データが得られてから議論が可能になる。

以上、地球・月観測では、打ち上げ後、NIRSとしてはじめて面光源の天体の観測を実施することができた。観測では1次元スキャンおよび2次元スキャンの動作試験も行い、NIRSの視線方向を対象天体の表面上で動かすことにより、対象天体表面の2次元的な観測を実施することができ、小惑星近傍での本観測の観測シーケンスの確認をすることができたことになる。

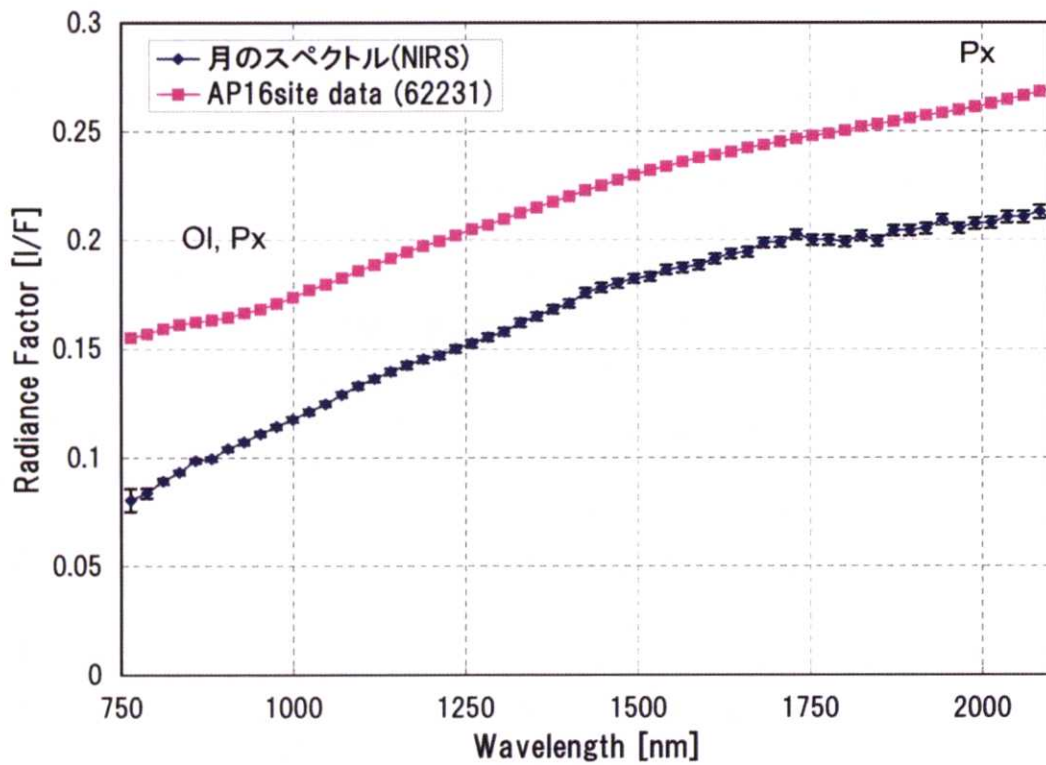


Figure 3-5-5 : Reflectance spectrum of the moon obtained by NIRS (Blue) and the reflectance spectrum of the lunar sample at the Apollo 16 landing site (Pink).
 NIRS で得られた月の反射スペクトル(青)。アポロ 16 号で持ち帰られた月の高地のサンプルの反射スペクトル (ピンク) も合わせて表示。

3-6 ランプ・LED モニタ

NIRS は打ち上げ後の検出器の感度特性の経年的な変化や分光器の波長ピクセル関係の経年的な変化をモニタするために、機器内部にハロゲンランプと LED ランプを搭載した。打ち上げ後定期的にランプ・LED のデータを取得し、その変化をモニタした。

Figure 3-6-1 に LED データの経年的な変化の様子を示した。図には小惑星滞在中に取得したデータも含まれている。LED データのピークピクセルを含む前後 3 ピクセルの出力を 2 次曲線でフィッティングしてピークピクセルを求め、その値の経年的な変化の様子を示したのが Figure 3-6-2 である。横軸は探査機打ち上げ直前の電源投入後からの積算時間 (TI) である。LED のピークピクセルは温度依存性があるため、探査機が太陽から遠ざかっていて、探査機の内部温度が低く、測定条件の異なっている期間 (TI=45000000~60000000sec 付近) に取得したデータは除外してある。プロットしたデータは光学ベンチ温度が -5°C ~ -8°C の範囲にあり、検出器温度が -15.15°C ~ -15.05°C の範囲内にあるものである。データ取得は NIRS の電源オンから一定時間後に LED の電源を投入し、さらに一定時間後にデータ取得を行うようにした (小惑星滞在中の取得データについては、その限りではない)。

Figure 3-6-2 をみると長期間にわたって、ピークピクセルの値が大きな値 (短波長側) にシフトしているように見える。しかし、その変化の大きさは最大に見積もっても 0.5 ピクセル程度で、観測波長分解能以下の変化であり、観測に対して大きな影響はない。変化の原因については、LED の温度特性の変化や光学系の変化が考えられるが、現時点では特定できていない。

Figure 3-6-3 にはランプデータの経年的な変化の様子を示した。こちらの図も小惑星滞在中に取得したデータも含まれている。打ち上げ直後の 2003 年 5 月 16 日に取得したデータで規格化して、ランプデータの相対的な変化を示したのが Figure 3-6-4 である。ランプデータも LED データと同じ日に取得しており、プロットしたデータは光学ベンチ温度が -5°C ~ -8°C の範囲にあり、検出器温度が -15.15°C ~ -15.05°C の範囲内にあるものである。データ取得は NIRS の電源オンから一定時間後にハロゲンランプの電源を投入し、さらに一定時間後にデータ取得を行うようにした。ただし、小惑星滞在中の取得データについては、その限りではなく、2005 年 6 月 1 日に取得したデータと、9 月 4 日以降に取得したデータで大きな変化があるように見られるのは、その影響であると考えられる。しかし、それ以前のデータにも、短波長側で感度が高くなっていく傾向も見られるため、実際の経年変化を示している可能性もある。変化の原因については、ハロゲンランプの温度特性の変化や光学系の変化が考えられるが、現時点では特定できていない。放射線による光学系の透過率の低下については、感度が下がり、かつ短波長ほど感度が下がる傾向が高くなるはずであるため、放射線による劣化とは考えられない。

小惑星到着までのデータを見る限りでは、834nm~2083nm の観測波長範囲では 10% 以下の変化、観測波長全域(764nm~2100nm)については 20% 以下の変化にとどまっている。

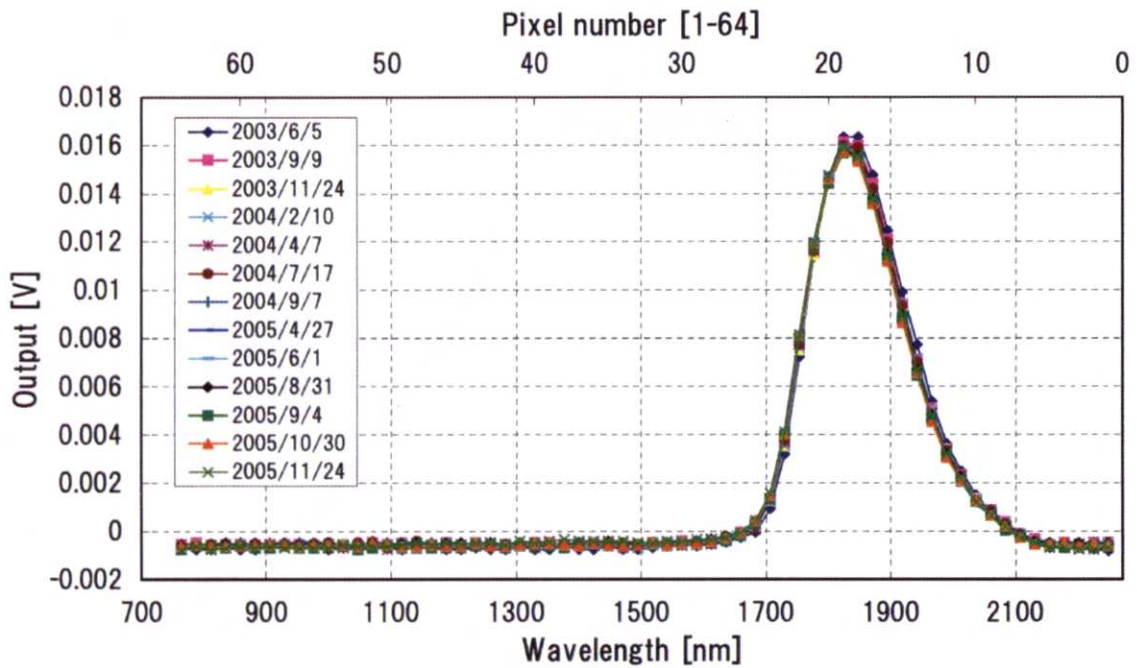


Figure 3-6-1 : Change of LED data.
LED データの経年的な変化

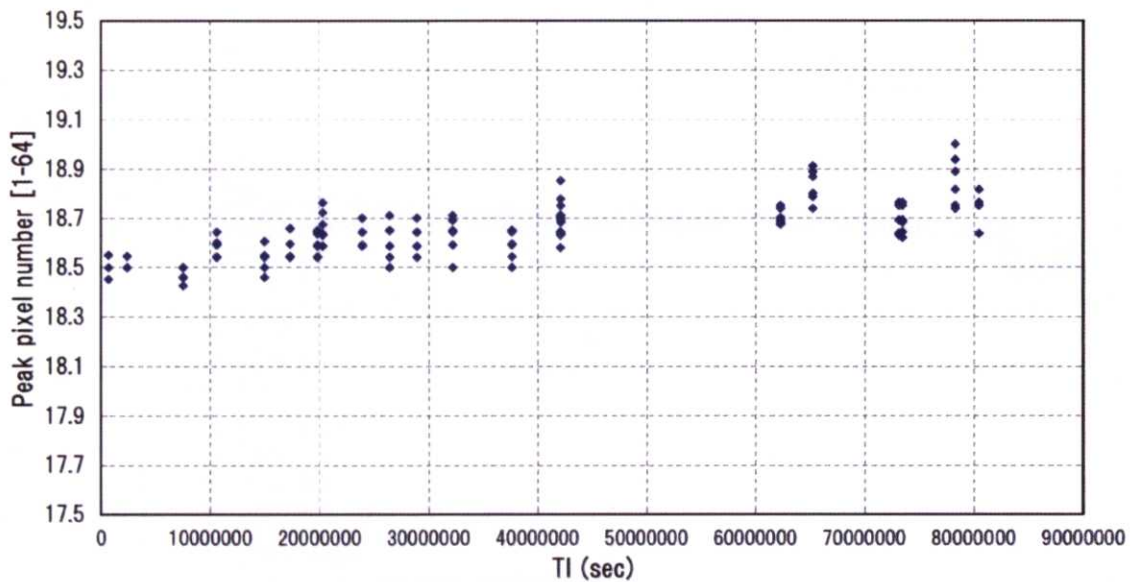


Figure 3-6-2 : Change of peak pixel number of LED data as a function of time. Horizontal axis is the time from that after the power supply injection just before the launch.

LED データのピーク位置の経年的な変化。図の横軸は、探査機打ち上げ直前の電源投入後のからの積算時刻。

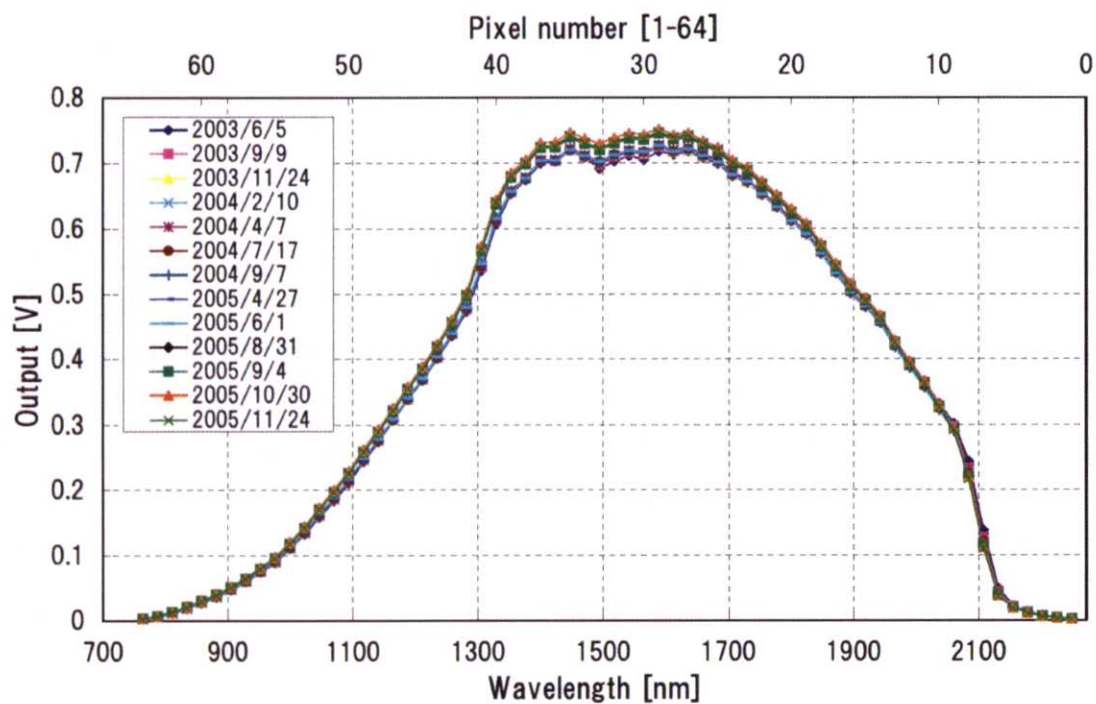


Figure 3-6-3 : Change of Lamp data.

ランプデータの経年的な変化

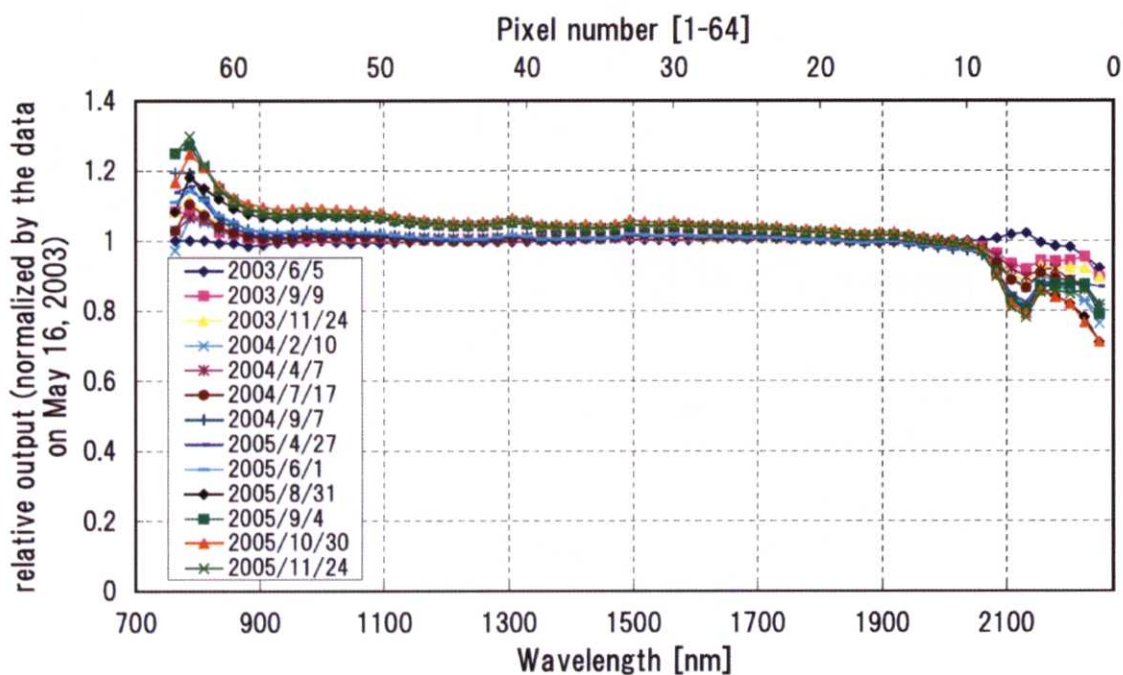


Figure 3-6-4 : Change of Lamp data. Data is normalized by the data on May 16, 2003.

ランプデータの経年的な変化。打ち上げ直後の2003年5月16日に取得したデータとの相対的な変化として表現。