

特集 「さあ、小惑星に行こう!—小惑星サンプルリターン計画」

近赤外線分光器

安部正真¹、石橋之宏¹、松浦周二²

本稿では、MUSES-C探査機搭載用に開発中の近赤外線分光器について、これまでの開発の経緯と現在の状況についてまとめる。

1. 開発の経緯

MUSES-C小惑星探査計画は、1996年度より正式にスタートしたミッションであるが、1993年度には宇宙研の理学委員会のもとにおかれた「小惑星探査ワーキンググループ」で、1994年度と1995年度は工学委員会のもとにおかれた「小惑星探査計画ワーキンググループ」で検討が行われてきている。しかし、「小惑星探査ワーキンググループ」の活動をまとめた『小惑星サンプルリターン計画書』[1]には、まだ赤外線観測器についての記述はない。

MUSES-C搭載用赤外線観測器についての検討が始まったのは、1994年9月に開かれた小惑星探査理学検討会以降である。この会議以降、中村昭子を中心として赤外線観測器について検討が進められた。1995年度途中から、松浦周二らが加わり、検討が急速に進んだ。1995年度までの検討については、『MUSES-C計画概要』[2]にまとめられている。この時点での観測波長域は2~4 μm の分光観測であった。

1996年度からは、松浦を開発責任者として検討が進められ、光学系の具体的な設計および検出素子の選定をはじめ、全体の製作実現性について検

討が進められた[3]。しかし、1996年11月に、搭載機器選定のためのヒアリングが行われた結果、観測波長域の変更による製作実現性および信頼性の向上と、さらなる軽量化を求められた。そこで我々は、観測波長域を1~2 μm に変更して製作実現性を向上させ、重量も2kgに抑えることによって機器選定されるに至った。その後改めて光学系の具体的な設計、および検出素子の選定などを行い、現在に至っている。なお、松浦が1997年度より渡米することにともない、現在は、安部が責任者担当を引き継ぎ、本分光器の開発を行っている。

2. 科学目標

本分光器では、小惑星表面を0.9~2.1 μm の波長域(近赤外域)で観測する。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。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。また、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、表面物質の非一様性を調べることができる。特に、今回の探査対象であるネレウスのような直径1km程度の小さな小惑星において、表面物質分布の非一様性が確認されれば、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することは重要である。小惑星表面の空間分解は、分光器の視線方向を小惑星表面に対して変

¹宇宙科学研究所惑星研究系、²通信総合研究所関西先端研究センター

化させることにより行う。

本分光器で得られる近赤外スペクトルに、可視カメラの多色フィルターによる観測情報と、ライダーによる表面反射能測定を合わせれば、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る。これによって、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。このように、本分光器は、小惑星構成物質の推定をする上で重要であり、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。

本分光器で、どのような鉱物種について存在の推定が可能かについて、以下の節で簡単な説明を行う。より詳しい鉱物の反射スペクトルについては、[4]と[5]などを参照されたい。

2.1 輝石およびかんらん石

輝石およびかんらん石は、隕石に多く存在する鉱物で、小惑星の反射スペクトルによる分類の多くも、これらの鉱物の示す吸収バンドの位置や深さで主に分類されている。輝石およびかんらん石の吸収バンドは $1\mu\text{m}$ と $2\mu\text{m}$ 付近にあり、これらの波長域の観測は地上でもできる。現在までに得られているネレウスの可視6色のフィルターによる観測では、 $1\mu\text{m}$ 付近に目立った吸収は見られていない。したがって、あっても吸収が弱い、場所的に違いがあるために、地上からは平均化されて見えなくなっている可能性がある。本分光器では、近接観測の特徴を生かして、高いS/N(シグナルとノイズとの比)と十分な波長分解能で小惑星の表面を観測し、これらの吸収バンドを検出する。同時に、これらの鉱物による吸収が、異なる場所でど

う変化するかについても調べることができる。

輝石やかんらん石についての反射スペクトルの研究は進んでおり、その吸収ピーク位置やバンドの深さ(あるいはその吸収バンドの面積)によって、輝石とかんらん石の量比だけでなく、かんらん石に含まれる鉄の量や、輝石に含まれる鉄およびカルシウムの量についての情報が得られることがわかっている。

2.2 水に関する情報

隕石の中には、CIやCMコンドライトに見られるように、水質変成を受けたものがある。小惑星についても、 $3\mu\text{m}$ 付近にあるOHバンドの吸収が、様々なタイプの小惑星で観測されている。これらの小惑星の表面には、層状珪酸塩などの含水鉱物が存在すると考えられている。これらの鉱物は、かつて表面に存在していた水(H_2O)、あるいは内部に存在している水が、何らかの熱源で融かされたときに、表面の無水鉱物と結びついてできたと考えられている。地上からの可視6色の観測から推定されているネレウスのスペクトルタイプは、E, M, P, Cのいずれかであろうと言われている。これら全てのタイプで、 $3\mu\text{m}$ 付近の吸収が観測されている小惑星が存在することから、ネレウスの表面にも、層状珪酸塩などの含水鉱物が存在する可能性が高い。

本分光器では、地上からは観測しづらい $1.4\mu\text{m}$ および $1.9\mu\text{m}$ 付近の観測が行える。このことにより、 $1.4\mu\text{m}$ 付近のOHバンドや、 $1.9\mu\text{m}$ 付近の H_2O の吸収バンドの有無を調べる。層状珪酸塩鉱物は、 $0.7\mu\text{m}$ 付近にも浅い吸収バンドを持つので、この特徴が可視カメラでとらえられれば、それと組み合わせでより詳しい情報となる。

2.3 その他の物質情報

長石、スピネルなどの鉱物も、それぞれ、 $1.2\mu\text{m}$ 、 $2.0\mu\text{m}$ 付近に特徴的な広いバンド幅の吸収を持つ。それらが小惑星表面に存在していれば、本分光器で吸収バンドを検出できる。炭酸塩鉱物の特徴的な吸収は、 $1.7\mu\text{m}$ から長波長側にいくつか見られるが、本分光器では $1.9\mu\text{m}$ 、 $2.0\mu\text{m}$ 付近の吸収を検出できる可能性がある。炭化水素に関する吸収は、 $3\mu\text{m}$ 付近に多くあるが、それらの倍音の組み合わせが、 $1.7\mu\text{m}$ から $2.0\mu\text{m}$ に現れるために、検出できる可能性がある。FeNiが存在すると、長波長程高い反射率になるから、反射スペクトルの波長依存性から、その存在量についての情報を得ることができる。

2.4 表面状態

反射スペクトルは、表面物質の粒度や表面の凹凸によって変化する。特にネレウスのような小さな小惑星の場合、重力が小さいため、レゴリスな

どがなく、岩盤が露呈している可能性がある。この場合には、通常の拡散反射とは異なる反射スペクトルが観測されるだろう。

今後これらの問題は、装置の開発と並行して研究していく必要があるが、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情報などを総合的に用いて、小惑星の表面状態に関する情報と、表面物質の情報とを分離したいと考えている。

3. この機器の特徴

本分光器の検出器には、InGaAs半導体リニア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。このため、冷却機構に要する重量を軽減することができる。さらに、今回用いる検出器は、チャージアンプ、ホールド

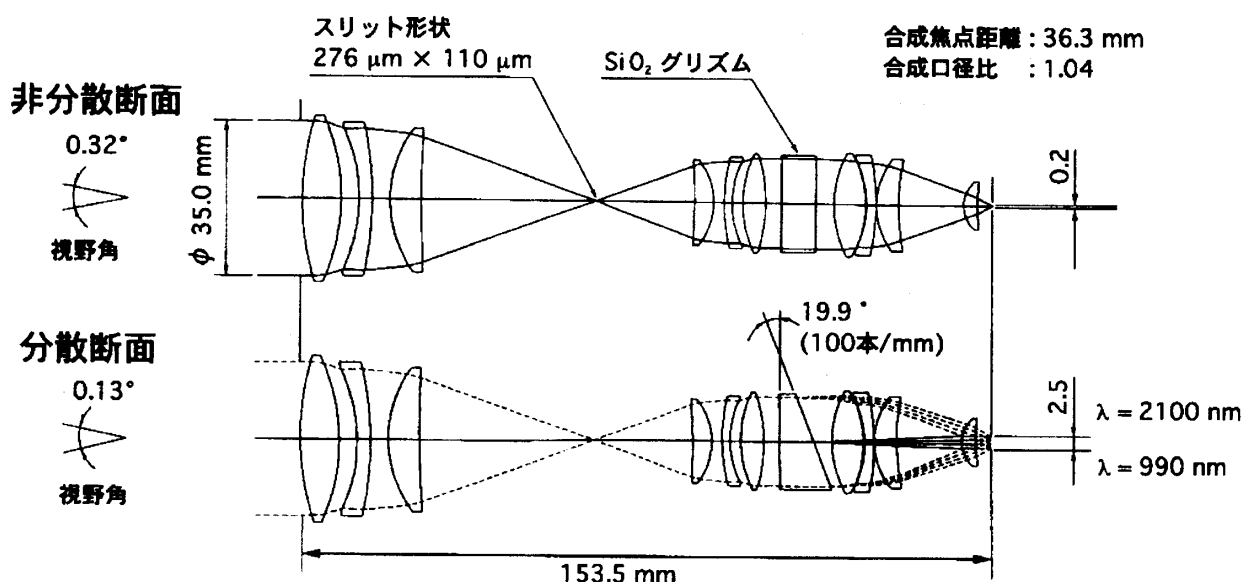


図1. 光学系の設計例

表1. NIRSの検出器の標準仕様

検出素子：InGaAs
 画素サイズ：80 μ m(分散方向) \times 200 μ m(非分散方向)
 画素数：32
 画素ピッチ：100 μ m
 出力信号電圧：<1.5V
 出力直線性：< \pm 2%,出力振幅電圧： \leq 1.0V
 出力電圧均一性：<5%
 感度波長域：0.9 μ m \sim 2.1 μ m
 感度：0.15A/W@0.9 μ m,1.0A/W@1.5 μ m,
 1.0A/W@2.1 μ m
 暗電流：<1nA,@-10度C
 飽和電荷量：10.0pC 直線性保証範囲
 欠陥画素：0.0%
 冷却素子：2段または3段

表2. NIRSの光学系の標準仕様

入射瞳径(有効径)： ϕ 35.0
 合成口径比：F1.1
 視野角(全角)：0.32deg.(非分散方向) \times
 0.13deg.(分散方向)
 分散波長域：900nm \sim 2100nm
 分散幅：32mm
 構成(レンズ枚数)：10群10枚
 レンズ材料：BaF₂/FDS1/CaF₂
 スリットサイズ：276 μ m \times 110 μ m
 グリズム：SiO₂製グリズム
 全長：160mm程度
 収差レベル(RMS Spot Diam)：20 μ m程度
 光学系効率：20%程度

回路，スイッチ及び走査回路までが，集積回路にて構成されてセンサのパッケージ内に収められているため，読み出し回路の軽量化につながっている。

表3. NIRSの重量・電力・サイズ・データ発生レート

重量：2kg(目標値)
 消費電力：10W以下
 (ペルチエ素子駆動電力は除く)
 サイズ：200 \times 100 \times 100程度
 発生データレート： $(fs/m) \times n \times 12$ bit
 fs：サンプリング周波数(全チャンネル読み出し周波数)(1kHz,TBD)
 n：チャンネル数(40,TBD)
 m：同一チャンネルデータの平均回数(100,TBD)

る。

また，光学系には，レンズグリズム光学系を採用している。光学系の構成要素には集光などのために用いるレンズと反射鏡、波長分散のために用いるグレーティング(反射回折格子)とグリズム(透過回折格子)などがあるが，今回はレンズとグリズムの組合せで光学系を構成することにした。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た。またこの方式では，レンズおよびグリズムが一直線上に並び，光軸合わせが比較的楽に行なえるという利点もある。レンズ材には，これまで宇宙搭載実績のない新しい素材を採用している。これらの素材を用いることにより，非常に明るくかつ色収差の少ない光学系を構成することが可能になっている。

分光手段として，グリズムを用いたことにより，本来は観測波長域は1オクターブ以内に制約される。しかし，本分光器では，プリズムあるいはフィルターによって1次光と2次光を分離させる工夫を行い，1オクターブ以上の観測波長域を実現させる。本分光器の光学系で集光する赤外線のスIGNAL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を可能にしている。

4. 装置仕様

本分光器の現在の標準仕様を、表1~3に示す。検出器および光学系ともにまだ確定してはおらず、若干の変更はあり得る。サイズについても、本分光器が光学ジンバルに搭載されるか否かで変わる可能性がある。表3には、探査機固定の光学系・処理回路一体型の場合で見積もった分光器の重量・必要電力・サイズ・データ発生レートを示した。また標準仕様にはほぼ近い光学系設計解を、図1に示す。

現在の仕様で達成できる観測波長分解能は、約40nmである。また空間分解能については、高度約20kmでのグローバルマッピングフェーズにおいて、小惑星表面を100m程度、高度約3kmでの詳細マッピングフェーズにおいては、10m程度に分解して観測できると考えている。装置のS/Nについては、実際に製作してみないとわからない点が多いが、太陽光の反射強度が一番弱い2.1 μ m付近でも、S/N=100以上で観測できることを目標としている。

5. 装置の評価・実験

これまでに、標準仕様でのS/Nの見積もり、レンズ材の耐放射線試験、検出器の基本性能評価などを進めており、その結果について報告する。

5.1 S/Nの見積もり

予想されるネレウスからの赤外線強度と、この値から計算される本分光器で予想される検出器上への赤外線強度を、表4に示す。ただし、ネレウスの反射率が0.4程度ある可能性もあり、その場合は、強度は各波長で8倍になる。また、鉱物の吸収がない場合、0.9 μ m、2.1 μ mでの強度は、さらに2倍になる。

表4には、本分光器で予想される信号電流と暗電流の比も示した。どの波長においても、値が1以下になっているが、観測では、この暗電流をシャッターを用いたチョッピングによって除去するため、暗電流の揺らぎに対する信号電流がS/Nとなる。暗電流の揺らぎがショットノイズとして考えられる場合には、積分時間1秒とすると、一番フラックスの小さい2.1 μ mでもS/N=1000以上になる。しかし、実際は、暗電流を差し引きするまでの時間内の温度変化による暗電流の揺らぎが一番大きい誤差を与える。暗電流の温度特性は、9%/Kと言われており、2.1 μ mで1%の精度で測定を可能にす

表4. 予想されるNereusからの赤外線強度aと信号電流/暗電流比

波長 [μ m]	集光レンズ全面での 赤外線強度[W/cm ² /sr/ μ m]	検出器上での 赤外線強度[W/pixel]	信号電流/暗電流比
0.9 ^b	5×10^{-4}	3×10^{-10}	0.045
1.5 ^c	5×10^{-4}	3×10^{-10}	0.3
2.1 ^d	5×10^{-5}	3×10^{-11}	0.03

a:太陽からの距離1AUにいるNereusを視野いっぱいに見る場合で、Nereusの反射率(鉱物の吸収なし)を0.05と仮定。b:Olivine/Pyroxeneによる50%の吸収を仮定。c:鉱物による吸収なし。d:Pyroxeneによる50%の吸収を仮定。

るために要求される必要温度制御精度は、 3.3 fc mK/sec 、 fc ：シャッター開閉周波数となる。現在シャッターとしては、電磁アクチュエータを用いたストローク 1mm 程度の小型軽量なものを使用し、これをスリットの直前に置くことを検討している。シャッター開閉周波数は、 1Hz より高周波数で駆動できると考えている。探査機の熱環境条件が現在のところはっきりしていないが、要求精度が数十 mK/sec 程度であれば、温度制御は十分可能であると思われる。

5.2 レンズ材の耐放射試験

現在の光学系の標準仕様で用いるレンズ材は、 CaF_2 、 BaF_2 、FDS1である。またFDS1(HOYA社)のかわりに、IRG2(SCHOTT社)やPBH71(OHARA社)の素材を用いることも検討されている。これらの素材を使用することにより、収差が少なくかつ $F=1$ 程度の非常に明るい光学系を設計することができ、サイズの小型化かつ S/N の向上を実現している。しかし、 CaF_2 以外は、宇宙搭載実績がない素材であるため、耐放射線試験などの環境試験を行う必要がある。

現在までに BaF_2 およびIRG2について耐放射線試験を行ったが、そのうちの BaF_2 についての結果を、図2に示す。MUSES-C計画では、打ち上げからネレウス観測終了までに被曝する放射線量は、アルミ 1mm 程度の厚さでシールドされた物体で 10^4rad 程

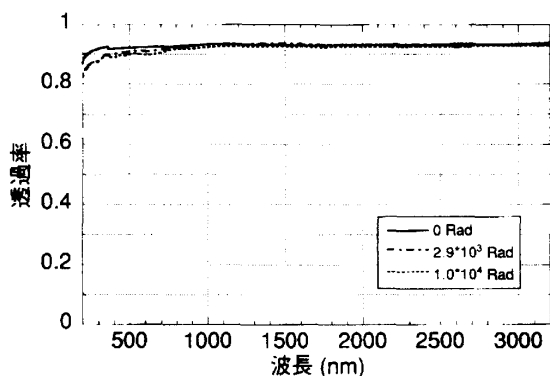


図2. BaF_2 の耐放射線試験結果

度であると言われている。したがって、光学系前面にある集光レンズ以外は、 10^4rad 程度の放射線に対して、透過率などの特性が変化しないことが要求される。今回行った 10^4rad までの照射試験では、可視域で5%程度の透過率の低下が見られるが、分光器で用いる近赤外領域では、めだった透過率の低下がないことがわかった。引き続きこれらの素材について、 10^4rad までの照射試験と、残りの素材についての照射試験も行う予定である。

5.3 検出器の基本性能評価試験

標準仕様で示した検出器の性能は、カタログ値から推定したものである。暗電流特性や感度などが、実際にどうなるかは検出器を入手し測定してみる必要がある。

我々は、浜松ホトニクス製作のInGaAsリニアイメージセンサG6893-128($2.1\mu\text{m}$ カットオフタイプ)を購入し、検出器の暗電流の大きさのバイアス電圧特性と、温度特性について調べた。得られた暗電流の温度特性の試験結果を、図3に示す。

今回入手した検出器の感度特性は、標準仕様と同じであるが、素子サイズが標準仕様に比べて $3/8$ の大きさである。暗電流の大きさは、素子面積に比例すると考えられるので、図3に示した値を $8/3$ 倍する必要がある。それでも、暗電流の大きさがノミナル仕様の $1/5$ 程度のもので入手できる可能性があることがわかった。このことは、5.1で議論した、

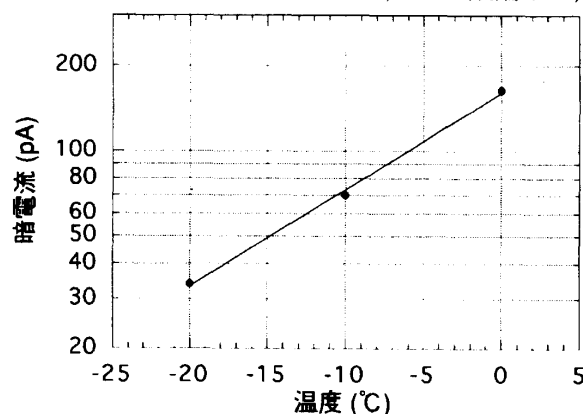


図3. 検出器の暗電流の温度特性

必要温度制御精度が5倍に緩和されたことと同等であり、装置製作の実現可能性および信頼性が、さらに向上したとも言える。

6. 今後の展望

我々は、以上に述べたような装置の基本設計をこれまでにを行い、標準仕様の製作実現可能性について検討を行ってきた。今後、熱設計、構造設計、データ処理系の検討を合わせて行い、光学系および検出器の仕様の再検討も含めた詳細設計に入っていく予定である。

しかし、詳細設計に入る前に十分な検討をしておかなくてはならない問題として、装置のキャリブレーション方法についての検討がある。打ち上げ前に地上で十分なキャリブレーションを行うことは当然であるが、これまでの宇宙空間に打ち上げられたほとんどの機器がそうであったように、打ち上げ後の装置の性能が、打ち上げ前と比べて変化することが予想される。したがって、打ち上げ後およびネレウス観測中に、何らかの方法で装置の性能のキャリブレーションを行う必要がある。

そこで本分光器には、機器内部に較正ランプを搭載し、必要に応じて機上でキャリブレーションを行えるようにする予定である。ただし、較正ランプそのものが変化する可能性もあり、他の方法によるキャリブレーションを併用することが望ましい。本分光器が、光学ジンバルに搭載されることになれば、ジンバルの向きを変えて太陽光反射板などを観測する方法が考えられる。しかし、探査機に固定される場合には、打ち上げ直後の地球及び月の観測、航行中の明るい恒星や惑星などの観測、ネレウス全体の観測、サンプリング地点やターゲットプレートの観測、などによる機器の機上キャリブレーション方法が考えられる。実際には、これら複数の方法を組み合わせていくことに

なるだろう。

謝辞

本分光器の開発は以下に示す近赤外線分光器開発グループメンバーで行っています。(順不同) 安部正真(宇宙研), 松浦周二(通総研), 石橋之宏(宇宙研), 長谷川直(宇宙研), 藤原顕(宇宙研), 中村昭子(宇宙研), 飯島祐一(宇宙研), 高木靖彦(東邦学園短大), 周藤浩士(通総研), 佐藤修二(名古屋大), 佐藤公泰(東大), 鳥田孝典(東大), その他に関係メーカーとして東芝, 浜松ホトニクス, ジェネシア

参考文献

- [1] 宇宙科学研究所, 1994: 『小惑星サンプルリターン計画書』
- [2] 宇宙科学研究所, 1996: 『MUSES-C 計画概要』, 464 pp.
- [3] 石橋之宏ほか, 1996: 小惑星探査用近赤外線分光器の開発. 第18回太陽系科学シンポジウム集録, 5-8
- [4] Gaffey, M. J., Bell, J. F., and Cruikshank, D. P., 1989: Reflectance Spectroscopy and Asteroid Surface Mineralogy. in *Asteroids II*. (Binzel et al., Eds.), U. Arizona Press. 98-127.
- [5] Gaffey, M. J., Burbine, T. H., and Binzel, R. P., 1993: Asteroid spectroscopy: Progress and perspectives. *Meteoritics* **28**, 161-187.