

第4章 小惑星近傍での観測

4-1 小惑星近傍での運用の概要

はやぶさ探査機は、2005年9月12日に小惑星イトカワから20kmの距離に到着した。NIRSによるイトカワの最初の観測データは探査機のイトカワ到着の2日前に小惑星からの距離約50kmで取得された。Figure 4-1-1に小惑星近傍滞在中の探査機の位置を示す。この図は小惑星相対座標系におけるプロットで、座標軸は、小惑星を原点として小惑星から地球方向を+Z軸にとり、小惑星・地球・太陽のなす面をXZ平面として、黄道面の北側を+Y軸と定義した。探査機の位置決定精度はスラスタ噴射による擾乱の入る頻度にもよるが、小惑星相対座標で数m~10m程度である。

Figure 4-1-2に、小惑星近傍滞在中の探査機と小惑星の距離、太陽位相角、NIRSのフットプリントサイズの履歴を示す(安部他, 2006; Abe *et al.*, 2006b)。

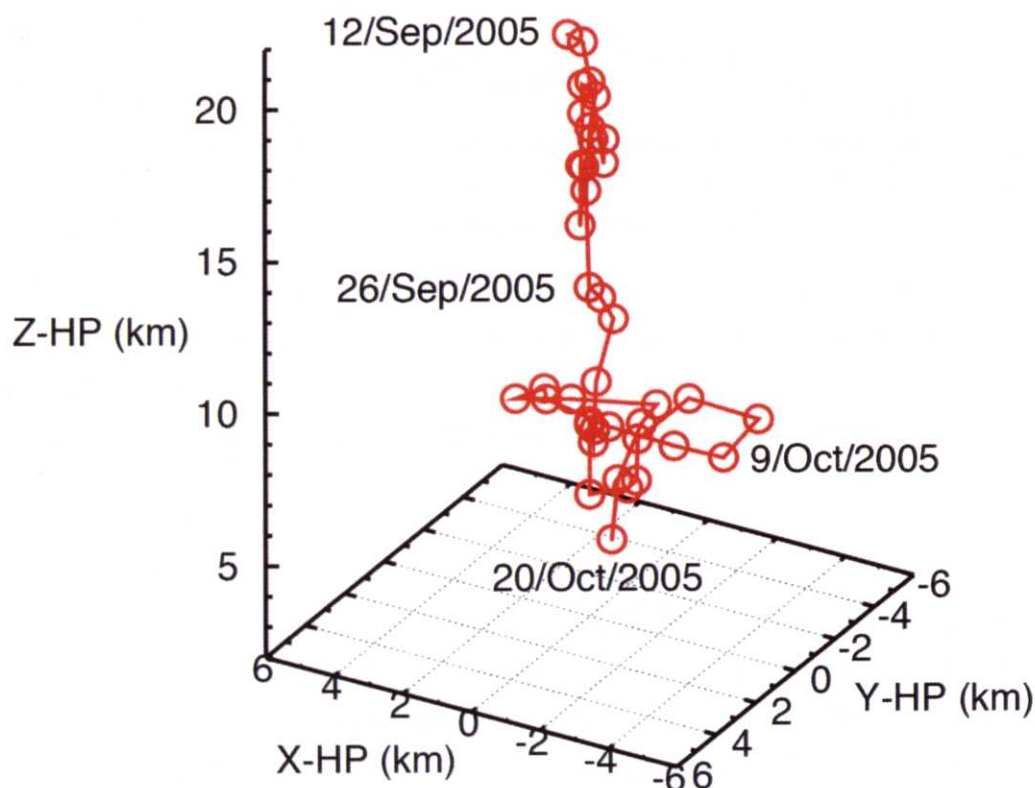


Figure 4-1-1 : History of the position of the spacecraft in the asteroid relative coordinate system during the rendezvous phase.

小惑星滞在中の小惑星相対座標系での探査機の位置の履歴

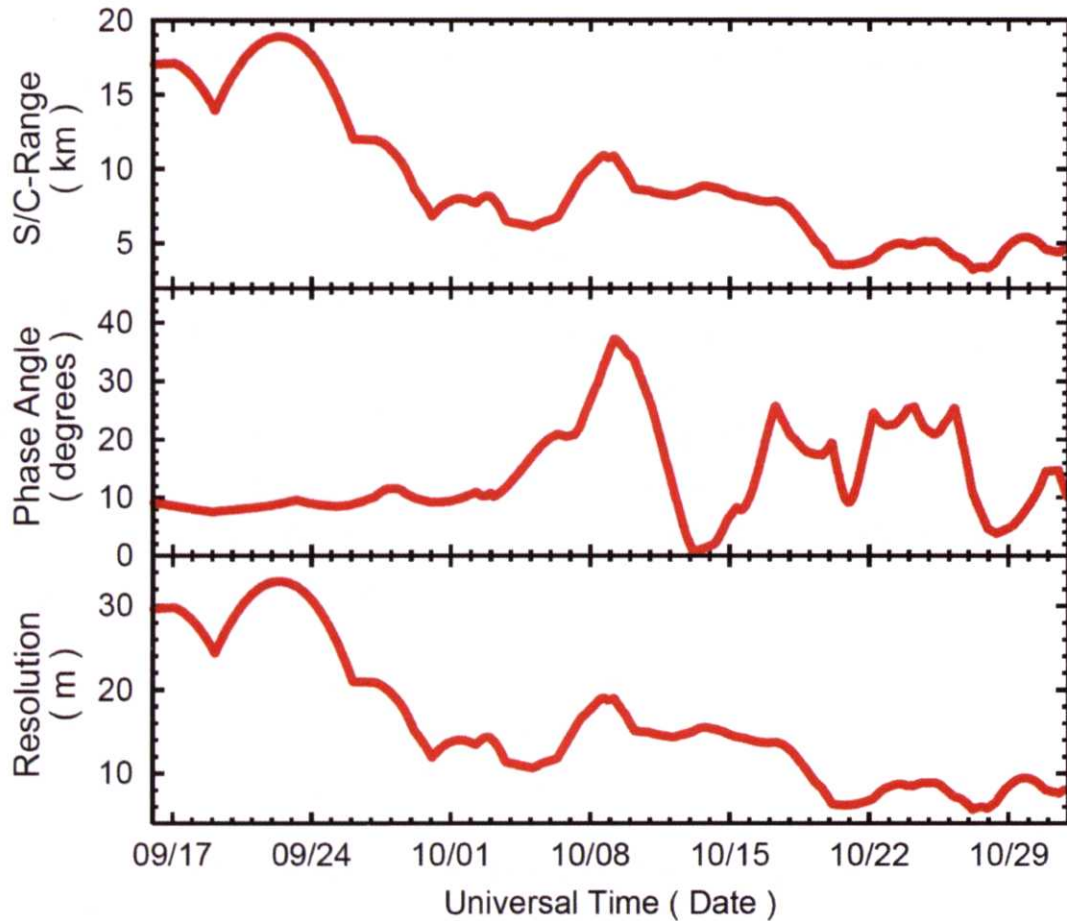


Figure 4-1-2 : History of the distance between the spacecraft and the asteroid (top), the solar phase angle (middle), and the footprint size of NIRS (bottom) during the rendezvous phase.

小惑星滞在中の探査機と小惑星との距離（上）、太陽位相角（中）、NIRS のフットプリントサイズ（下）の履歴。

Figure 4-1-1 および 4-1-2 に示したように、探査機は小惑星到着後しばらく（9 月中）は探査機の位置を、小惑星と地球を結ぶ線上に留めて運用を行った。この間、探査機の小惑星からの距離を保つ運用の確立を行い、小惑星の大まかな形状の把握も行った。この時期の太陽・小惑星・地球のなす角は約 10 度で、探査機から観測した小惑星上の点の太陽位相角もこの間約 10 度で一定である。10 月はじめには、探査機の小惑星からの距離を 7 km 程度まで近づけ、さらに詳細な小惑星の形状と地形の観測を行った。また 10 月に入ってから、探査機の位置を、小惑星と地球を結ぶ線上からはずして、太陽位相角の異なる条件での観測や、小惑星を高緯度からの観測ができる位置に探査機を移動させて観測を行った。

NIRS および探査機の運用イベントの履歴を Table 4-1-1 にまとめる。また取得したデータの観測パラメータについては、Appendix 3 にまとめる。

Table 4-1-1 : Operational history during the rendezvous phase.

小惑星近傍での運用履歴

| | |
|-----------|-------------------------------------|
| 9月4日 | Cal データ取得 |
| 9月10日 | 最初のイトカワのスペクトル取得@50 km |
| 9月11日 | 最初の連続観測 (12 時間) @30 km |
| 9月12日 | Gate Position 到着@20 km |
| 9月15日 | 小惑星トラッキングをしながらの連続観測開始 (WCT-mode) |
| 9月17日 | 最初の AMICA7 色撮像との同時観測 |
| 9月19日 | 非可視中の WCT-mode での連続観測開始 (16 時間) |
| 9月24日 | 1次元スキャン観測 (2時間) |
| 9月27日 | 小惑星オフセットトラッキングをしながらの連続観測開始 |
| 9月29日 | Home Position 到着@7 km |
| 10月5日 | Home Position Tour 開始 |
| 10月7日 | LIDAR フラグと同期させた観測の開始 |
| 10月9-10日 | 高太陽位相角観測@38度 |
| 10月13-14日 | 低太陽位相角観測@0度 |
| 10月17-19日 | 南半球観測 |
| 10月20日 | 南半球上空での近接観測@3.5 km |
| 10月21日 | 8分の1周回軌道投入 (重力計測) |
| 10月22日 | 北半球上空での近接観測@3.5 km |
| 10月23-24日 | 北半球観測 |
| 10月26日 | Home Position Tour 終了 |
| 10月27-29日 | 赤道上空での近接観測@3.5 km |
| 10月30日 | Cal データ取得 |
| 11月4日 | Touch Down リハーサル 1回目(高度 700 m まで接近) |
| 11月9日 | 航法誘導リハーサル(高度 70 m および 500 m まで接近) |
| 11月12日 | Touch Down リハーサル 2回目(高度 55 m まで接近) |
| 11月16-18日 | LIDAR フラグと同期させた観測 |
| 11月19-20日 | Touch Down 1回目 |
| 11月24日 | Cal データ取得 |
| 11月25-26日 | Touch Down 2回目 |

NIRS の出力の平均値データのプロットを Figure 4-1-3 に示す。全ピクセルの平均値をプロットすることで、NIRS に入力した平均的な入光のレベルの変化が把握できる。NIRS が小惑星滞在中に取得した全スペクトル数は 10 万個以上で、そのうち、平均出力が 0.1V 以上のデータは 8 万個以上ある。これらのデータは NIRS のフットプリントが小惑星上にあると考えられる。1 日の中での出力の変化は、観測している場所の違いや、フットプリントの入射角の変化によっており、観測日の違いによる変化は、太陽からの距離の変化や太陽位相角による違いと考えられる。はやぶさの小惑星滞在中の太陽からの距離は Figure 4-1-4 に示すように、1.2AU から 0.95AU まで時間とともに小さくなっており、NIRS の平均出力が全体的に増加傾向にあるのはそのためである。太陽位相角による変化については 4-3 章で詳細に議論する。観測時の積分時間は 10 月 13 日に 16.896 msec にしたとき以外は 25.6 msec で固定している（タッチダウン運用時および Cal データ取得時は除く）。詳細な観測パラメータについては Appendix 3 に記載した。また近接観測では、小惑星表面の場所による変化がより大きくなる傾向があり、ピーク値が高くなる傾向がある。10 月 2 日に観測データがないのは、2 台目のリアクションホイールの故障により、観測を一時停止したためである。10 月 22 日に観測データがないのは、重力計測のために、探査機の姿勢変更も停止させたため、NIRS のフットプリントが長期間小惑星から外れているためである。11 月に入ってからは、基本的にはタッチダウン運用時にのみ観測を行い、それ以外は NIRS のフットプリントが小惑星から長期間外れているか、観測を停止していたため、観測データが少ない。

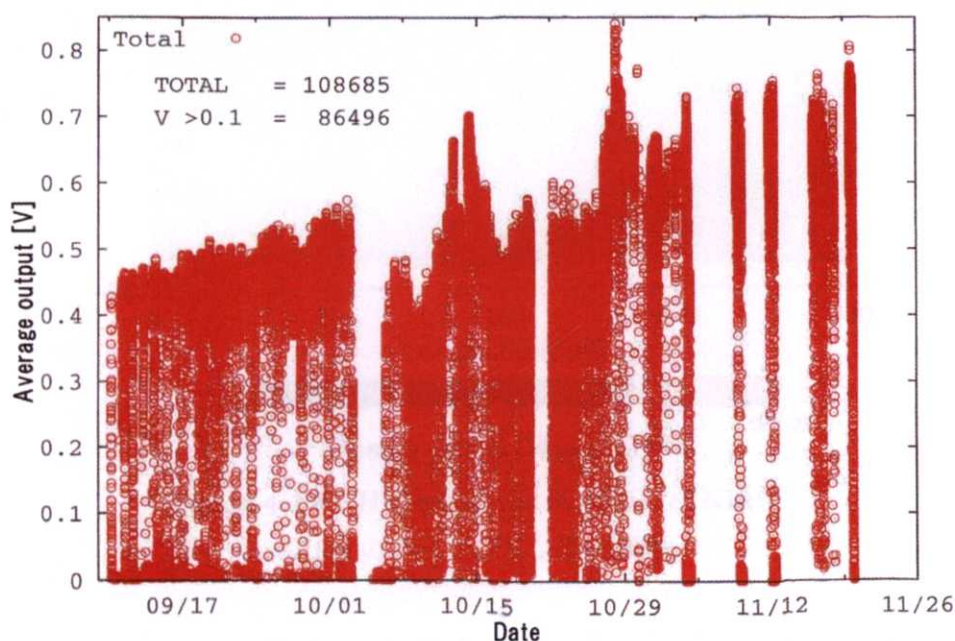


Figure 4-1-3 : Change of the average output of NIRS data.
全ピクセルの平均出力の変化

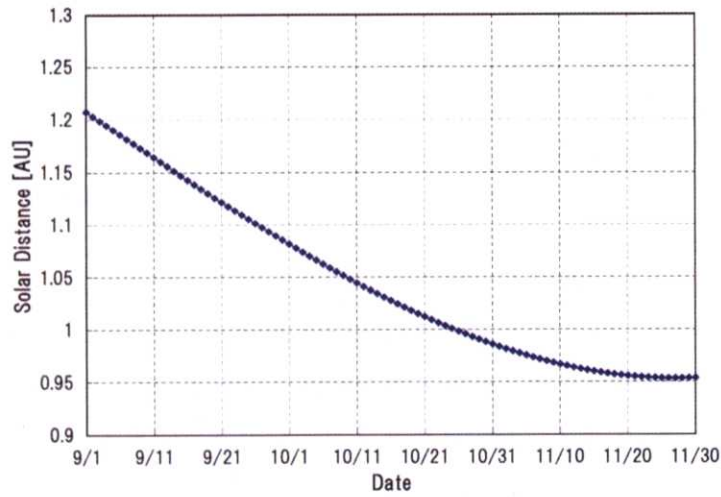


Figure 4-1-4 : Change of the solar distance during the rendezvous phase data.
小惑星滞在中の太陽距離の変化

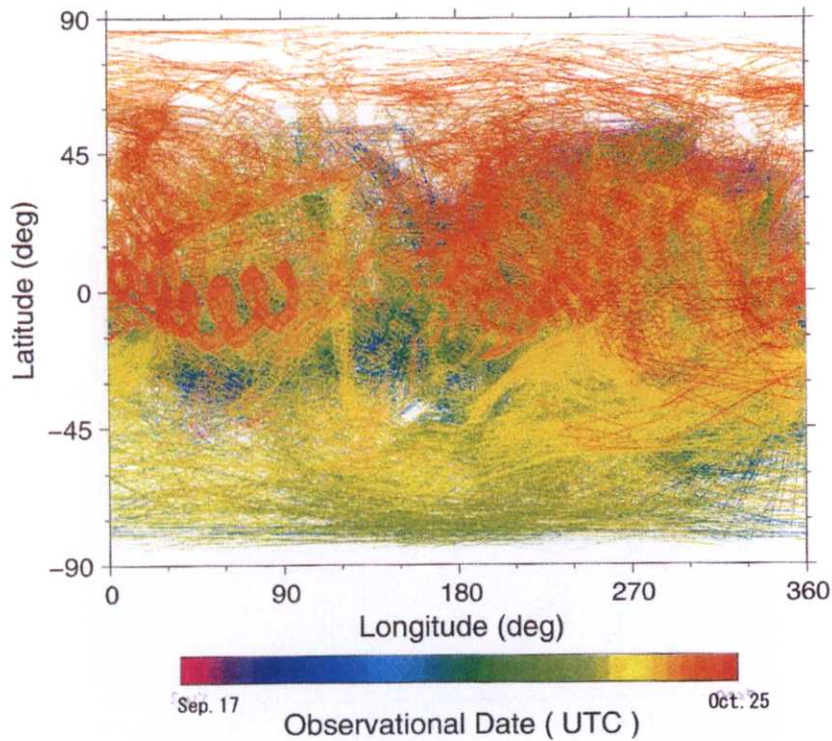


Figure 4-1-5 : History of the footprint of NIRS.
NIRS のフットプリントの履歴

NIRS のフットプリントの履歴を Figure 4-1-5 に示す。この図をみると、9 月は小惑星の赤道を中心に観測を実施し、10 月前半は南半球を、後半は北半球を観測していることがわかる。また観測全期間で、小惑星の全体をカバーできていることが分かる。

4-2 スキャン観測

NIRS の視野サイズは 0.1 度であり、NIRS の視線方向を任意の地点に向けるためには、0.1 度以内の姿勢制御が必要である。はやぶさは本来 3 軸制御衛星であり、姿勢制御性能は 0.05 度以内の姿勢制御精度と 0.01 度以内の姿勢決定精度を持っていたが、2005 年 7 月末に 3 台あるリアクションホイールのうち 1 台が故障した。リアクションホイール 2 台でも、バイアスモーメント制御という手法を用いることにより、3 軸制御することは可能であるが、2 次元スキャンなどの微細な姿勢制御ができなくなった。そのため、小惑星到着直前のアプローチフェーズにおいて、NIRS の視野より小惑星の視直径が小さい状態で、2 次元スキャンを行い、NIRS の視野内に点光源のイトカワを完全に入れて、地上観測と同じ点光源での観測データを取得する予定であったが、それができなかった。

小惑星到着後は、探査機の姿勢は地球との交信中（日本からの可視中）には探査機のハイゲインアンテナを地球に向ける必要があり、NIRS の視線方向は小惑星から外れるが、非可視中は基本的にはカメラの画像中心に小惑星が来るような、小惑星指向を続けており、同時に NIRS の視線方向も小惑星上にある。Figure 4-2-1 に各観測機器の視野サイズとアライメントを示す。



Figure 4-2-1 : Field of view of each instrument (AMICA 5.7x5.7deg, XRS 3.0 x 3.0deg, NIRS 0.1x 0.1deg, LIDAR 0.04 x 0.097deg).

各機器の視野サイズ。AMICA（光学カメラ）の視野サイズは 5.7deg x 5.7deg。XRS（蛍光 X 線スペクトロメータ）の視野サイズは 3.0deg x 3.0deg。NIRS の視野サイズは 0.1deg x 0.1deg。LIDAR（高度計）の視野サイズは 0.04 x 0.097deg。

9月の運用は、基本的には、非可視中の小惑星指向の練習を行いながら、小惑星の形状データを取得するためのカメラ撮像を集中して行った。小惑星指向をするためには、カメラの画像を探査機のオンボードコンピュータで処理をして、画像の重心の座標を計算し、その重心が画像の任意の座標になるように姿勢制御を行う。基本的には探査機の-Z方向が小惑星の重心に向くように制御をするため、-Z方向とほぼ同じ方向に視線方向を持つNIRSのフットプリントは常に小惑星の重心近くに向いていることになり、この状態で連続観測を行うと、小惑星の赤道をスキャンすることになる。

9月21日と9月22日に実施した赤道スキャンの結果をFigure 4-2-2に示す。Figure 4-2-3は赤道スキャン時のNIRSのフットプリントの履歴である。このときの小惑星からの距離は約18 kmで小惑星表面上のフットプリントサイズは約30 mであり、小惑星の短軸の長さである210 mより十分小さい。

この図をみると、2日間にわたって実施された赤道スキャンの結果は非常によい再現性があり、小惑星指向がほぼ正確に実施され、NIRSのデータもNIRSの性能が安定していることを示している。

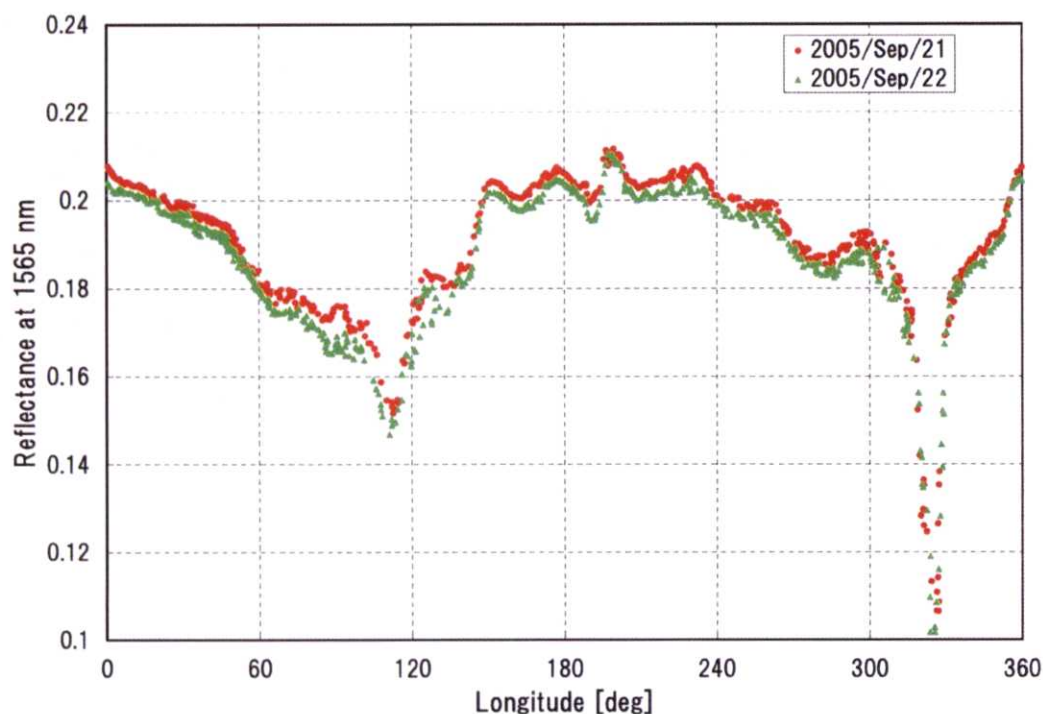


Figure 4-2-2 : Result of the equatorial scan on September 21(red) and 22(green).
9月21日(赤)と22日(緑)に実施された赤道スキャンの結果

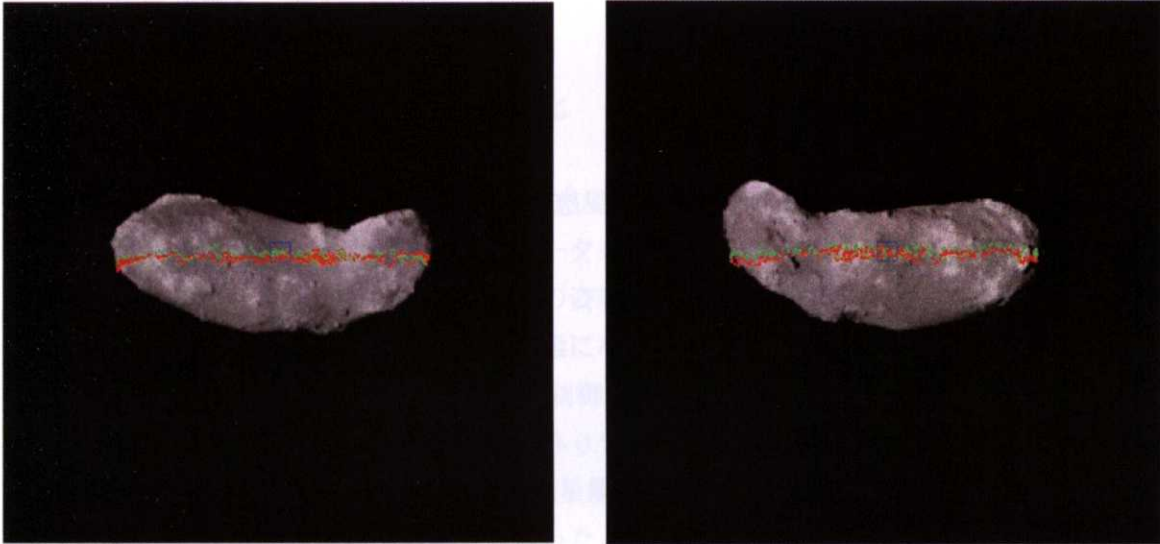


Figure 4-2-3 : Footprint size(blue) and history of footprint of NIRS at the time of the equatorial scan on September 21(red) and 22(green). Left is a eastern side view and right is a western side view.

赤道スキャンのときのNIRSのフットプリントサイズ(青)とフットプリントの履歴(9月21日は赤、9月22日は青で表示)。左は東側、右は西側から見た図。

経度 120 度付近および 330 度付近で出力が大きく下がっているのは、小惑星の長軸が探査機方向に向く直前で、NIRS のフットプリントにおける、入射角および射出角が大きくなっているためである。小さな出力の変動は、小惑星の反射率の変化の特徴を現していると考えられる。

4-3 太陽位相角を変えた観測

4-3-1 太陽位相角に伴う反射率の変化

9月の Gate Position での運用を終え、小惑星からの距離 7 km 付近の Home Position と呼ばれる箇所での詳細な一連の地形観測データを取得直後の 10月2日に2台目のリアクションホイールが故障した。その結果探査機の姿勢を3軸制御することが難しくなり、化学推進を用いた3軸制御をせざるを得ない状態になった。しかし消費燃料を節約するために、微小角のニューテーションを許容した姿勢制御を行うことになった。具体的には地球と交信中は観測データをダウンリンクする際のみ0.7度の制御を行い、それ以外は3度程度の制御でテレメトリを監視、また非可視中の小惑星観測もカメラの撮像をする際のみ0.7度の制御を行い、それ以外は5度程度の制御となった。

小惑星からの距離 7 km の距離でのイトカワの視直径は3度程度であり、NIRS の視線方向は小惑星上に必ずしもあるわけではない状態になった。またデータのダウンリンクの時間を節約するためにも、無駄なデータ取得を抑える必要があり、これまで連続観測だった運用を、LIDAR フラグ (LIDAR が自身の反射光を捕らえているかどうか (つまり LIDAR のフットプリントが小惑星上にあるかどうか) の判定フラグ) がたっているときのみ NIRS の観測データをデータレコーダに書き込む運用方法を筆者が考案し、10月7日以降は新運用方法に変更した。また、これまでデータスタック中の平均値と分散値以外に、最大・最小値も出力データとしていたのを、10月5日から平均・分散値のみにしている。

10月5日以前は、探査機の位置を小惑星と地球を結ぶ線上に置くように制御していた。これは、地球と交信中に、探査機のカメラや高度計で小惑星を捕えることを優先していたためである。小惑星の自転軸は黄道面に対してほぼ垂直であり、地球・小惑星・太陽のなす角 (太陽位相角) も小惑星滞在中の短い期間では大きく変わらないため、探査機がこの位置にいる限り、小惑星の高緯度地域の観測や、太陽位相角を変えた観測はできないという問題があった。この問題を解決するために、10月5日以降は、その制御をやめ、積極的に探査機の位置を動かして観測を行った。このような観測を我々は Tour と呼んでいる。

Tour における太陽位相角を変化させた観測によって、NIRS の出力の太陽位相角依存性を調べるデータを取得した。Figure 4-3-1 に太陽位相角と NIRS の出力の関係を示した図を記す。Figure 4-3-1 をみると、太陽位相角が小さくなるほど出力が大きくなる傾向が分かる (Abe *et al.*, 2006a)。同じ太陽位相角でも NIRS の出力が変化している原因は、観測時の太陽入射角および射出角が変化していること、イトカワ表面の反射率が場所によって変化していることがある。両者の定量的な議論については4-3-3章で行う。またその増加傾向は太陽位相角が5度より小さな範囲で急激に変化しており、これは Opposition effect と呼ばれる現象 (Hapke, 1993) を確認したことになる。Opposition effect についての議論は4-3-4章で行う。

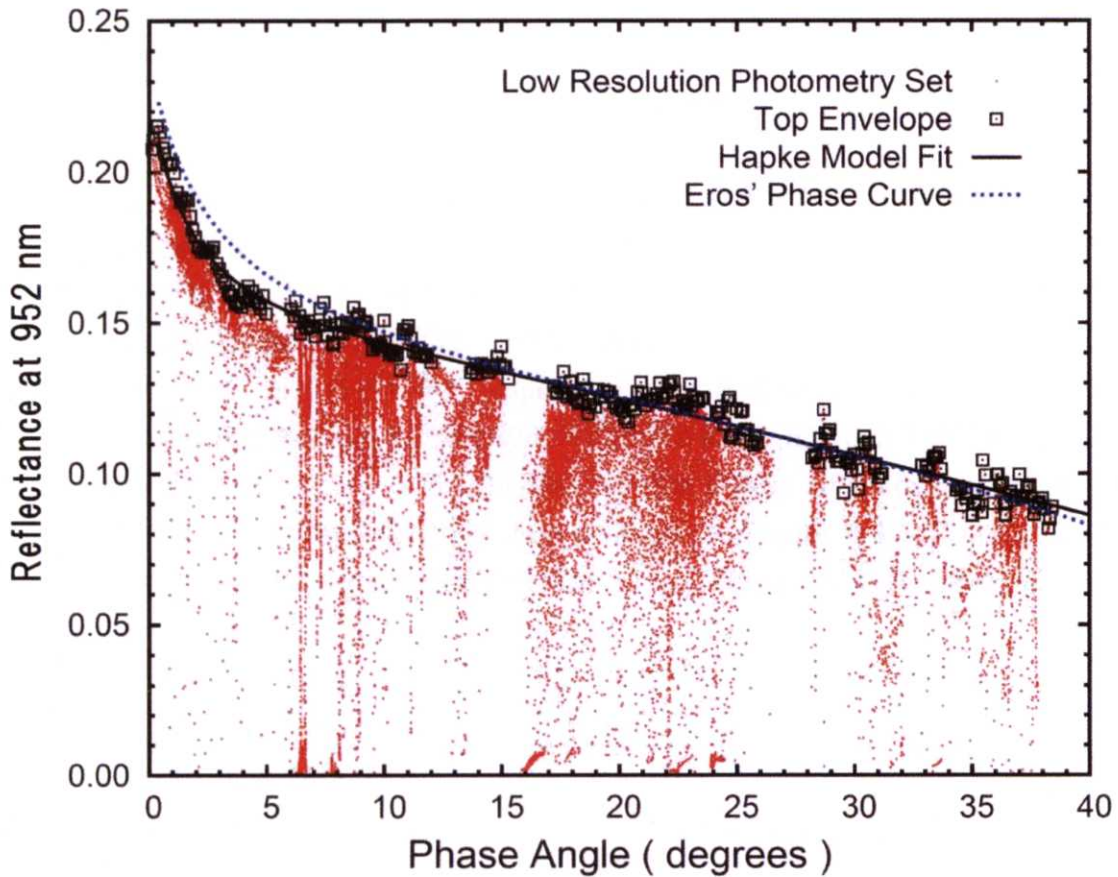


Figure 4-3-1 : Reflectance at 952nm as a function of solar phase angle.
 太陽位相角に伴う NIRS の観測フラックスの変化

4-3-2 Hapke パラメータの推定

Kitazato *et al.* (2006)は Figure 4-3-1 に示したデータを用いて、太陽位相角、太陽光入射角および射出角における NIRS の反射率の変化を、Hapke モデルを用いて波長ごとに調べ、各波長における Hapke パラメータを求めている。Kitazato *et al.* (2006)で用いた太陽光拡散反射のモデルは、バイディレクショナル反射率(Bi-directional reflectance)を

$$r(i, e, a) = (\omega/4)(\mu_0 / (\mu_0 + \mu)) ([1 + B(a, h, B_0)] F(a, g) + [H(\mu_0, \omega) H(\mu, \omega) - 1] S(i, e, a, \theta)).$$

と表すモデルである(Hapke, 1981, 1984, 1986, 1993)。ここで、 i, e, a は入射角、射出角、太陽位相角である。 H, B, S は散乱関数(scattering function)、後方散乱関数(backscattering function)、影関数(shadowing function)と呼ばれるものである。等方的な粒子の多重散乱効果と粒子同士の影の効果および観測空間分解能より小さなサイズの凹凸の影響を考慮した

拡散反射モデルとなっている。 P は単粒子の位相関数でここでは Henyey-Greenstein の単粒子位相関数を採用し、

$$P(\alpha, g) = (1 - g^2) / (1 + 2g\cos\alpha + g^2)^{3/2}.$$

としている。したがって、Kitazato *et al.*(2006)で採用したモデルにおける推定パラメータは、 $\omega, g, h, B_0, \theta$ の5つとなる。 ω は単粒子散乱反射率(single scattering albedo)と呼ばれ、単粒子に入光したフラックスに対する散乱透過するフラックスの割合である。 g は非等方パラメータ(asymmetry factor)と呼ばれ、 $g=0$ で等方散乱となり、 $g<0$ で後方散乱が、 $g>0$ で前方散乱が強くなる。 h, B_0 はそれぞれ、opposition effectを引き起こす原因を周囲の粒子による遮蔽効果が原因であると考えた場合のその効果の半値幅と振幅を表す量である。 θ は観測空間分解能より小さなスケールでの表面傾斜の平均値である。Kitazato *et al.* (2006)で求められた各パラメータの波長依存性を Figure 4-3-2 ~ Figure 4-3-5 に示す。なお、Kitazato *et al.* (2006)では θ に波長依存性はないとして固定としており、求められた値は $\theta=25$ 度であった。

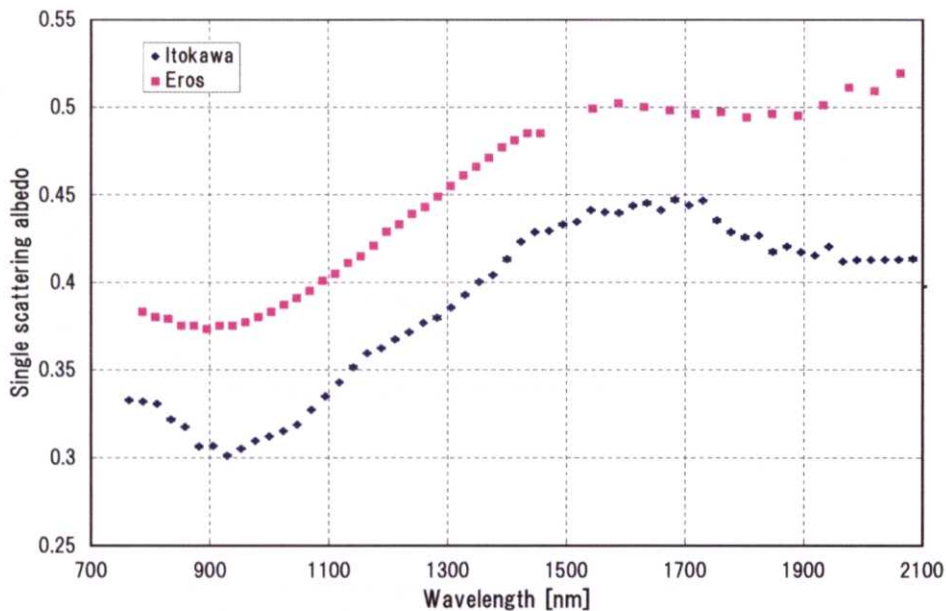


Figure 4-3-2 : Single scattering albedo (ω) of surface material of Itokawa (Blue) and that of Eros (Pink). Itokawa's data is from Kitazato *et al.* (2006), Eros' data is from Clark *et al.* (2002).

イトカワ表面の ω (single scattering albedo)の値 (青)とエロスの値(ピンク)。イトカワのデータは Kitazato *et al.* (2006)より。エロスのデータは Clark *et al.* (2002)より。

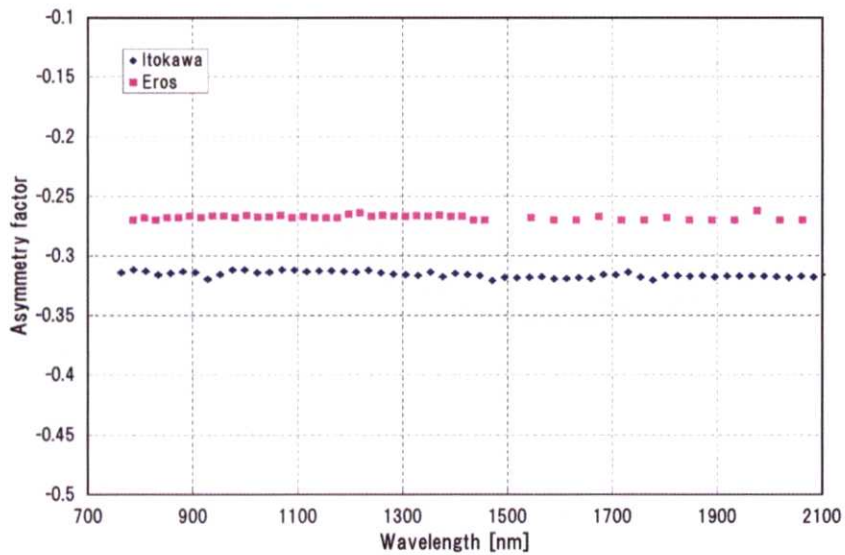


Figure 4-3-3 : Asymmetry factor (g) of surface material of Itokawa (Blue) and that of Eros (Pink). Itokawa's data is from Kitazato *et al.* (2006), Eros' data is from Clark *et al.* (2002).

イトカワ表面の g (asymmetry factor)の値 (青)とエロスの値(ピンク)。イトカワのデータは Kitazato *et al.* (2006)より。エロスのデータは Clark *et al.* (2002)より。

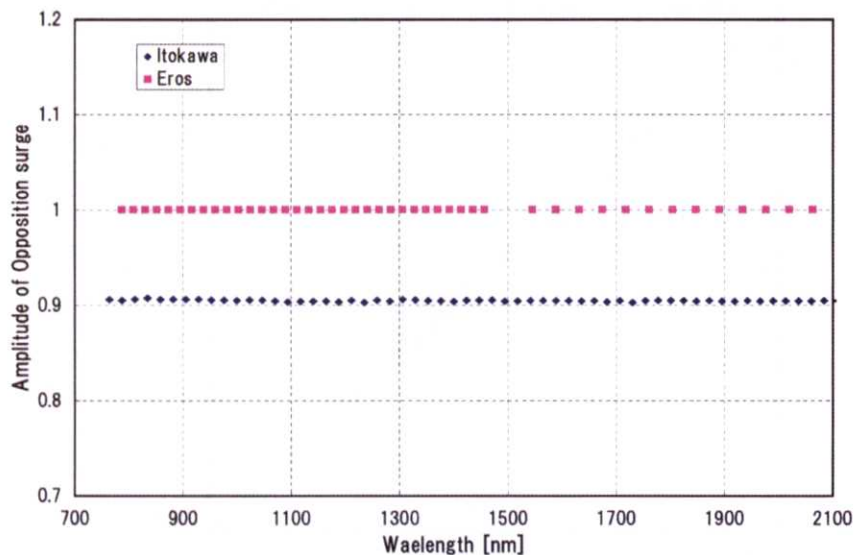


Figure 4-3-4 : Amplitude of opposition surge (B_0) of surface material of Itokawa (Blue) and that of Eros (Pink). Itokawa's data is from Kitazato *et al.* (2006), Eros' data is from Clark *et al.* (2002).

イトカワ表面の B_0 (Opposition 効果の振幅)の値(青)とエロスの値(ピンク)。イトカワのデータは Kitazato *et al.* (2006)より。エロスのデータは Clark *et al.* (2002)より。

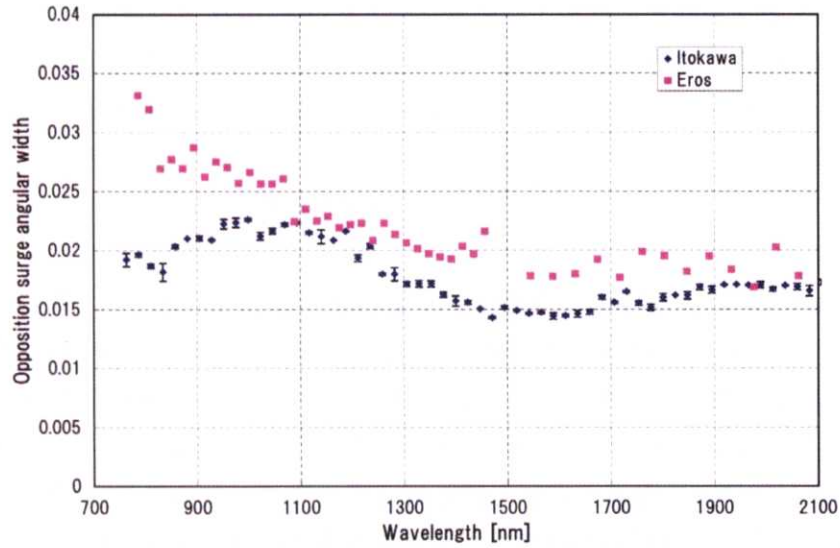


Figure 4-3-5 : Opposition surge angular width (h) of surface material of Itokawa (Blue) and that of Eros (Pink). Itokawa's data is from Kitazato *et al.* (2006), Eros' data is from Clark *et al.* (2002).

イトカワ表面の h (Opposition 効果の半値幅)の値(青)とエロスの値(ピンク)。イトカワのデータは Kitazato *et al.* (2006)より。エロスのデータは Clark *et al.* (2002)より。

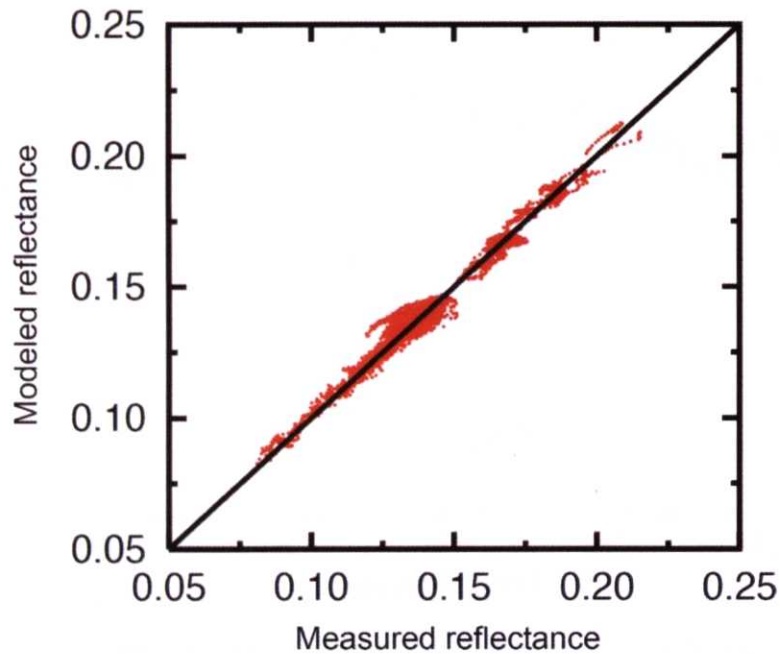


Figure 4-3-6 : Comparison between measured and modeled reflectance using Hapke parameters (Kitazato *et al.*, 2006) for 952 nm.

Hapke モデルのパラメータ(Kitazato *et al.*, 2006)を用いて推定したイトカワ表面の反射率と実際に観測された反射率の比較。

Figure 4-3-6 に、推定した Hapke パラメータを用いて計算した Itokawa 表面の反射率と、実際に観測された反射率を比較した結果を示す。この図からも推定した Hapke パラメータでイトカワ表面の反射率を 10%程度の精度で推定できていることがわかる。

4-3-3 イトカワ表面の反射率の変化

得られた Hapke パラメータを用いることで、太陽光の入射角(i)、射出角(e)、太陽位相角(a)の条件を同じにする幾何学補正を行うことが可能になる。Figure 4-2-2 に示した赤道スキンの結果に幾何学補正を行い、 $(i, e, a) = (30, 0, 30)$ の条件(単位は度)の反射率に直した値を Figure 4-3-7 に示す。太陽光の入射角および射出角が 60 度以上の地点については、探査機の位置・姿勢推定誤差のフットプリントの予測に対する影響が相対的に大きくなるため除去している。幾何学補正を行った赤道スキャンにおける反射率の変化は±10%程度であり、この変化はイトカワ表面の場所による反射率の違いが原因であると考えられる。

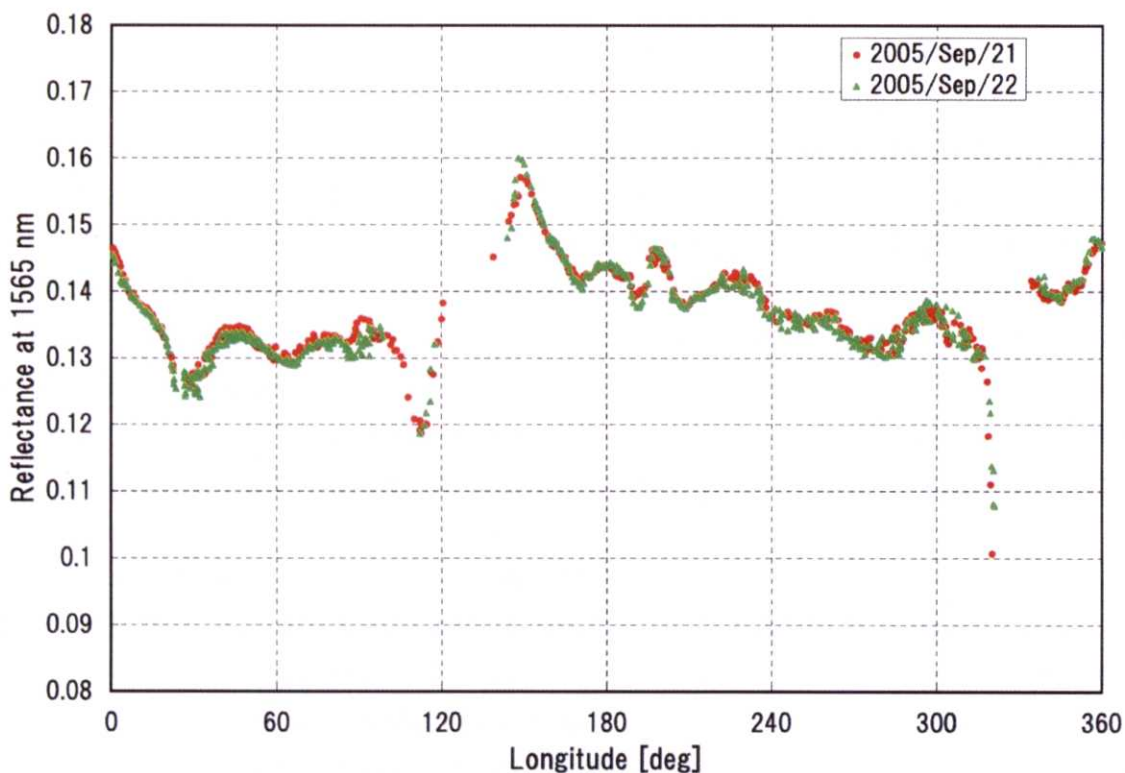


Figure 4-3-7 : Geometrical corrected ($(i, e, a) = (30, 0, 30)$) reflectance at the equatorial scan on September 21 (red) and 22 (green).

幾何学補正($(i, e, a) = (30, 0, 30)$)を行った 9 月 21 日(赤)と 22 日(緑)の赤道スキャンにおける反射率の変化

4-3-4 イトカワにおける Opposition effect

Opposition effect は一般的に太陽位相角が小さな範囲で後方散乱が急激に強くなる現象で、天体表面がレゴリスなどの粉体で覆われていると起き、その強さは、表面の反射率や、空隙率と関係があるといわれている(Hapke, 1986)。イトカワのような低重力の天体ではレゴリスなどの粉体が表面にとどまれないため、opposition effect がみられないことも予想されたが、実際にはエロスに比べると若干弱いながらもはっきりとした opposition effect が観察されている。ただし、イトカワの表面はカメラによる観測から、はっきりとレゴリスで覆われている領域は一部の領域で、ほとんどはボルダーと呼ばれる岩塊に覆われた地形であり、このような岩石の表面でも opposition effect が観察されることはある種の発見である。ただ、一部の研究では、岩石の表面でもざらざらした表面をもつ岩石には opposition effect が生じるという報告もあり (Shepard and Arvidson, 1999)、イトカワの表面の岩石もそのような表面を持っている可能性が高い。

Figure 4-3-2 ~ Figure 4-3-5 にはイトカワとの比較でエロスの Hapke パラメータを記した。エロスとの比較では ω, B_0, h はエロスより小さく、 g はイトカワ・エロスともに負の値で絶対値はイトカワの方が大きい。Hapke (1986)のモデルでは、粒子のサイズ分布を $n(r)=r^{-\beta}$ と仮定して、最大・最小粒子サイズを n, r_s とし、空間に締める粒子の存在割合を F (Filling factor) とすると、 n/r_s が大きいほど、 F が小さいほど、Opposition effect の半値幅に対応する h が小さくなる傾向がある。イトカワはエロスに比べて重力が低く、バルク密度も小さいことがわかっている。表面に粒子が存在する場合その空隙率が高い可能性があり F の値も小さくなるため、 n/r_s に大きな違いがなければ、イトカワとエロスの h の違いは表面粒子の空隙率の違いということになる。地上レーダ観測から得られているレーダ反射率 α_{oc} とレーダ偏光度 μ_c はそれぞれ、イトカワでは $\alpha_{oc}=0.16\pm 0.05$ 、 $\mu_c=0.26\pm 0.04$ (Ostro *et al.*, 2004)、エロスでは $\alpha_{oc}=0.25\pm 0.09$ 、 $\mu_c=0.28\pm 0.06$ (Magri *et al.*, 2001)、という値が得られており、この値から Margi *et al.* (2001)の方法で推定される表面の空隙率はイトカワの方が高く、その結果とも傾向が一致する。

Opposition effect の振幅については、 B_0 の値としてはイトカワの方が小さくなっている。しかし、経験的には反射率が高いほど B_0 の値が小さくなる傾向があり(Hapke, 1986)、得られた ω の大きさの関係とは矛盾している。一方 g の値は反射率が低い物質ほど後方散乱が強くなる傾向があり、この関係は得られた結果と一致している。Eros の Hapke パラメータ推定の際に B_0 の値を 1 に固定しており、実際のエロスの B_0 はイトカワより小さいと考えれば、得られた結果の矛盾はなくなる。

4-3-5 太陽位相角に伴う赤化現象

Figure 4-3-8 に 2 つの波長で観測される反射率の強度比と太陽位相角の関係をまとめる。反射率の強度比の変化はスペクトルの傾きの変化としても観察される。この図をみても分かるように、太陽位相角が大きいほどスペクトルの傾きが急になる（赤いスペクトルになる）様子を検出することができた。

太陽位相角が大きいほどスペクトルの傾きが急になるのは太陽位相角に伴うスペクトルの赤化現象で、エロスを探査したニア・シューメーカー探査機の NIS で初めて観測的に検出している(Veverka *et al.*, 2000)。この現象の原因は、拡散散乱における、後方散乱特性に波長依存性があること（波長が短いほど後方散乱しやすい）と関係があると考えられている。Figure 4-3-8 には得られた Hapke パラメータから計算されるモデルカーブも同時にしめしてある。

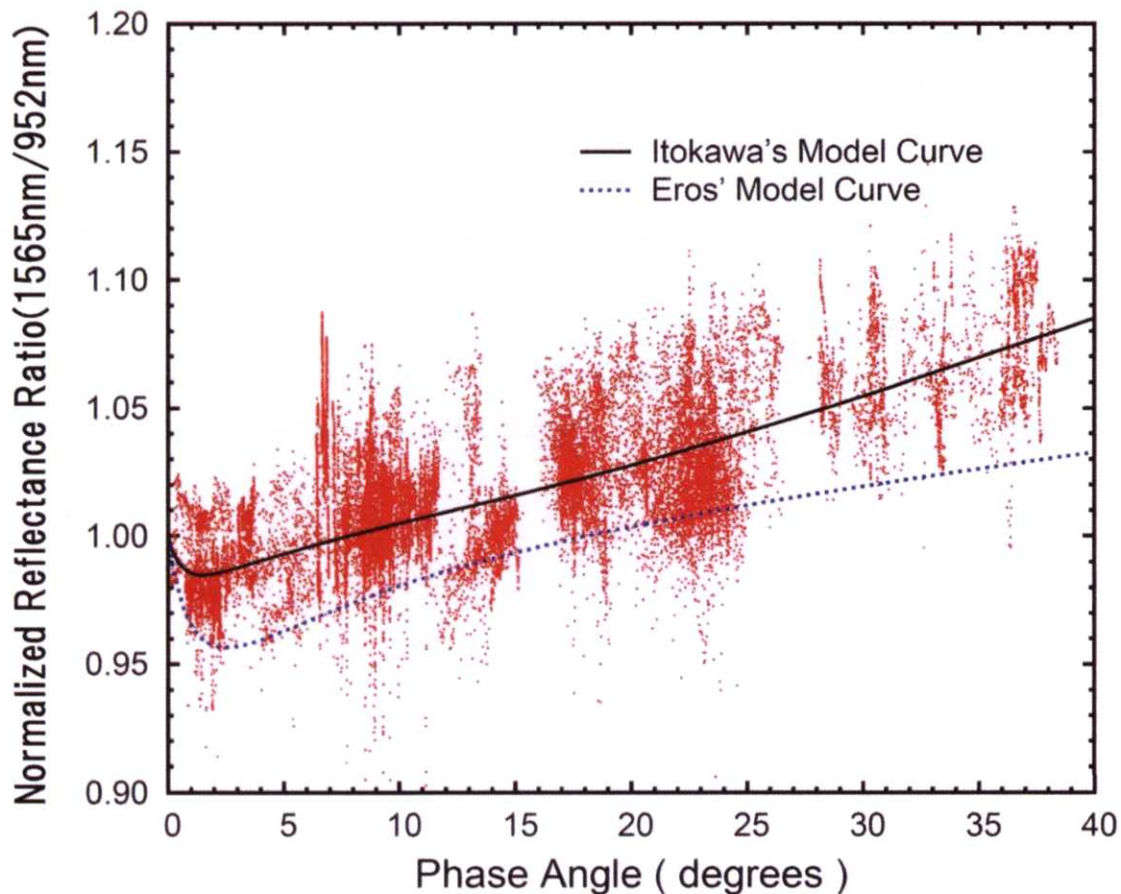


Figure 4-3-8 : Change of spectral slope as a function of solar phase angle.

太陽位相角に伴う、スペクトルの傾きの変化

4-3-6 イトカワのジオメトリックアルベド

得られた Hapke パラメータを用いて、イトカワを球形の天体と仮定した場合、下記の式でジオメトリックアルベド A を計算することができる(Hapke 1993)。

$$A \sim n[(1/2)+(1/6)n]+(\omega/8)[(1+B_0)P(0)-1].$$

ここで n は diffuse reflectance と呼ばれる反射率で

$$n=(1-\sqrt{(1-\omega)})/(1+\sqrt{(1+\omega)}).$$

である。 $P(0)$ は $\alpha=0$ のときの単粒子位相関数の値である。

Figure 4-3-9 に NIRS の観測波長域におけるジオメトリックアルベドを記す。スペクトルの形についての議論は第 5 章で行い、ここでは得られた反射率の絶対値について議論する。地上観測からは、可視光観測と熱赤外観測の結果を用いてイトカワのジオメトリックアルベドを推定していた(Appendix 1 参照)が、その結果は V バンド(中心波長 550 nm)において、0.19~0.53 と非常に幅広いものであった。NIRS の観測波長域は V バンドをカバーしていないので直接の比較は出来ないが、Binzel *et al.* (2001)で得られたイトカワの地上観測による反射スペクトルより、950 nm の反射率と 550 nm の反射率はほぼ等しいことから、NIRS における 952 nm のジオメトリックアルベドを V バンドのジオメトリックアルベドと等しいと仮定すると、0.21 となり、T. Müller *et al.* (2005)による 0.19(+0.11/-0.03)と近い値である。T. Müller *et al.* (2005)のモデルはレーダ観測で得られた形状モデル(Ostro *et al.*, 2005)を用いた Thermo physical model を計算しているため、他の結果より推定精度が高いと考えらる。

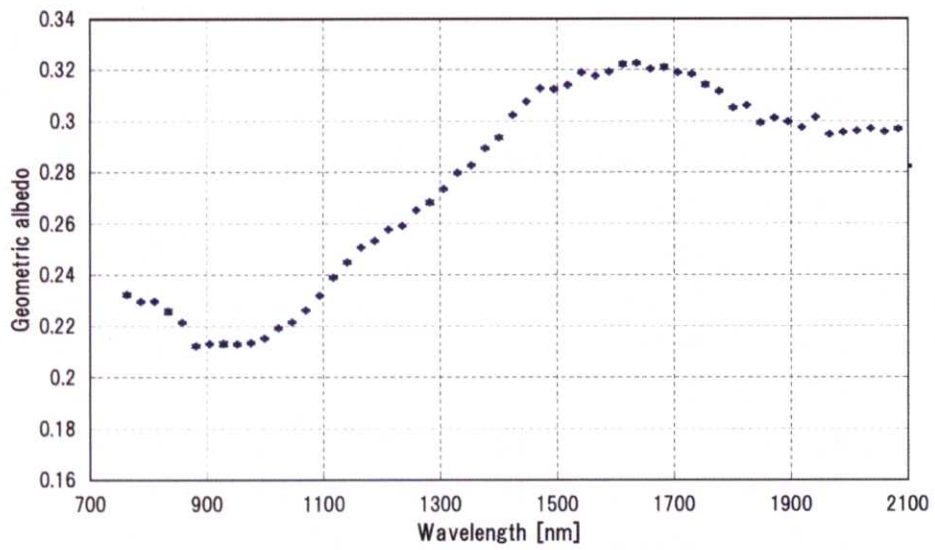


Figure 4-3-9 : Geometric albedo of Itokawa obtained by NIRS observation.
 NIRS の観測から得られたイトカワのジオメトリックアルベド

4-4 タッチダウン運用

はやぶさ探査機は、11月に入ると、表面物質のサンプリングのための接近降下運用を、リハーサルも含めて6回（11月9日に実施された航法誘導リハーサルは2回の接近降下と数える）実施した。接近降下中もNIRSはデータ容量の許す限り、連続観測を実施し、その際に、さらに高空間分解能のスペクトルを取得することに成功した。

また、小惑星に対する距離が近くなると、高度測定のために射出しているLIDARパルスの反射光がNIRSでも検出が可能になる。Figure 4-4-1は接近降下中に検出したLIDARパルスの反射光のスペクトルである。NIRSの51番チャンネル(観測中心波長は1069.88 nmで波長幅は23.56 nm)のみで検出されており、LIDARの送信光の波長が1064 nmであることと良く一致する。また打ち上げ前に実施したLIDAR送信光をNIRSで検出させたときの出力とも一致しており、打ち上げ前からこのときまで、波長ピクセル関係に変化がないことが確認された。さらに、LIDARの送信光軸とNIRSの光軸も打ち上げ前からこのときまで、変化しなかった（変化したとしても、NIRSの視野サイズ以下であった）ことも確認された。

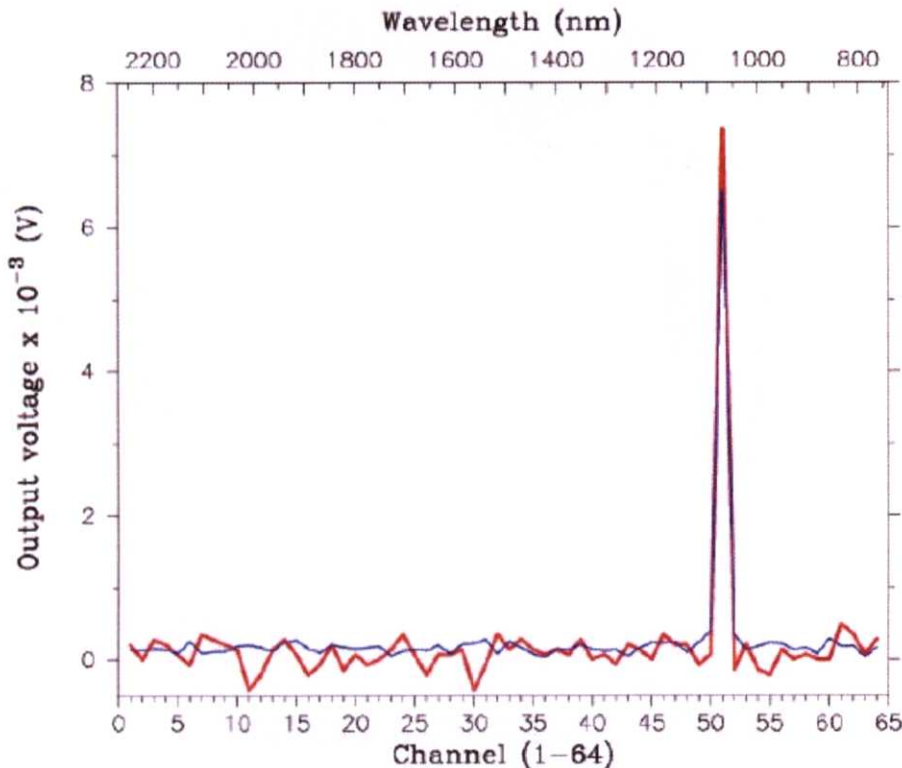


Figure 4-4-1 : LIDAR pulse spectrum(red) detected by NIRS during touchdown descent and same spectrum (blue) obtained at pre-launch test.

タッチダウン降下中にNIRSで検出したLIDARパルスの反射光(赤)と打ち上げ前の試験での結果(青)

なお、LIDAR パルスの反射光検出後は、LIDAR パルスの送信タイミングに積分していたデータについては、除去してスタックするように、観測モードを変えて観測を実施して、タッチダウン降下中の観測データに LIDAR パルスのデータが混在しないようにした。

Figure 4-4-2 には 11 月 19 日の第 1 回目のタッチダウン運用の際の LIDAR 計測による高度履歴と NIRS の出力履歴と示す。高度 40 m 程度までは、安定した観測データが取得できたことがわかる。40 m 以下で LIDAR 計測による高度計の値がおかしいのは、LIDAR そのものが近距離で使える仕様ではないため、正しくない値を出力したことによる。50 m 以下の近距離では別の近距離センサを用いて航法・誘導制御を行っている。21:30 以降に NIRS の出力がほぼゼロを示している期間は、ちょうど探査機が着陸していた期間に対応する。探査機が着陸している間は NIRS の観測領域は探査機の影の中であったことがわかる。

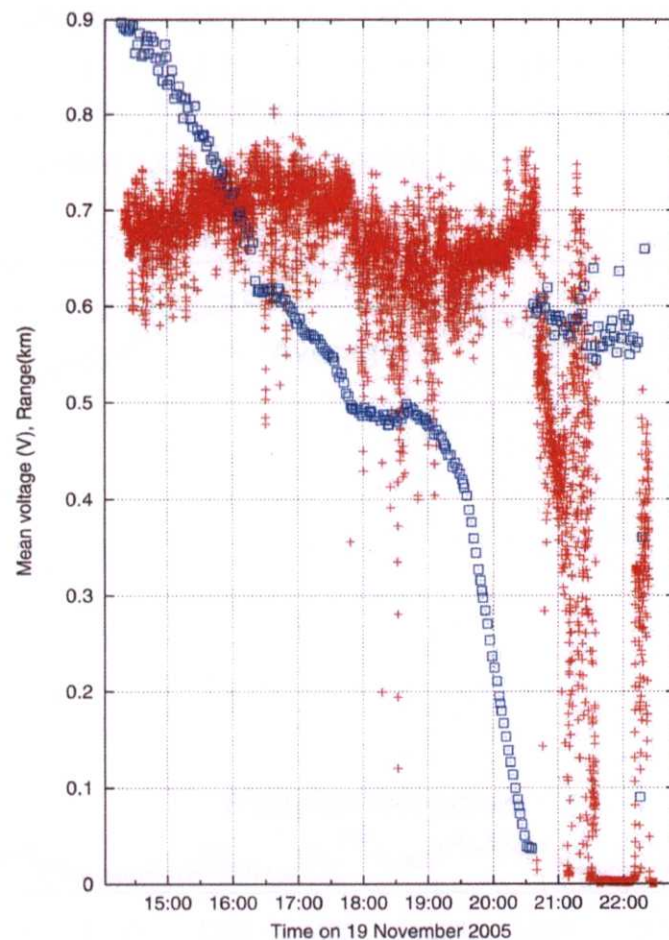


Figure 4-4-2 : History of range data by LIDAR (blue) and average output of NIRS (red) during the touchdown operation on November 19.

11 月 19 日のタッチダウン運用時の LIDAR 計測による高度履歴(青)と NIRS の平均出力履歴(赤)

4-5 小惑星観測時の観測精度

Figure 4-5-1 に小惑星観測時の代表的な出力例を示す。白抜き四角が各ピクセルの平均出力で、赤い菱形が各ピクセルの出力の標準偏差でノイズレベルに相当する。この出力に前章でも述べた地球・月観測のように、NIRS の感度特性をかけ、イトカワに入光する太陽光スペクトルで割り算することでイトカワの反射スペクトルを得ることができる。イトカワの反射スペクトルの詳細については、次の章で述べる。

小惑星滞在中の観測では、シャッター周期 1 回ごとの積分時間は 25.6msec とした。太陽位相角がゼロに近くなり、平均的な出力が高くなることが予想された時以外には、原則としてこの積分時間に固定して観測を行った、最大出力も大体 1~1.5V 程度で観測することができ、リニアリティーの保証されている範囲でかつ高い S/N を維持できる観測条件で観測を実施することができた。図をみてもわかるように、観測波長域の両端を除いて、広い波長範囲でデータの標準偏差（複数回のデータをスタックしている間のデータのばらつき）が平均出力の 100 分の 1 以下である。データのスタック回数については、NIRS のフットプリントの移動速度や、データ発生量を考慮しながら、32 回（測定時間約 4 秒）~512 回（測定時間約 1 分）の範囲で変更させて観測を実施した。

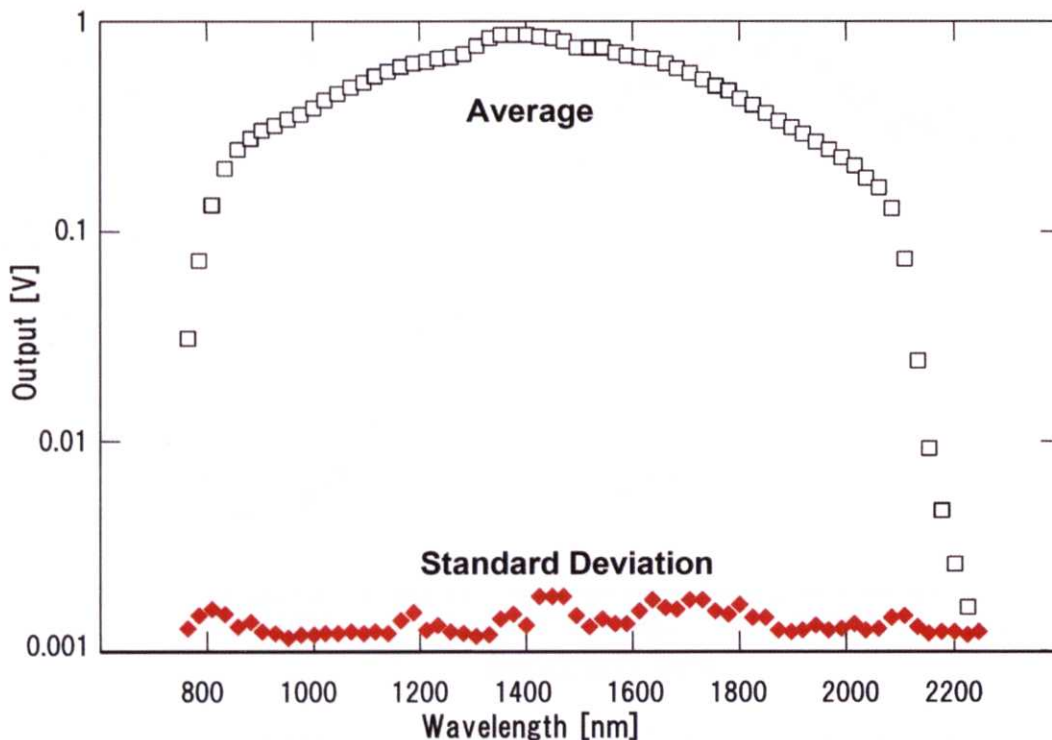


Figure 4-5-1 : Typical output (white square) and standard deviation of output (red diamond) at the time of asteroid observation.

小惑星観測時の典型的な出力（白四角）と標準偏差（赤菱形）