

第5章 イトカワの近赤外線反射スペクトル

5-1 イトカワの平均スペクトル

5-1-1 赤道スキャンによる平均スペクトル

NIRS で得られた、イトカワの近赤外線反射スペクトルを Figure 5-1-1 に示す。この平均スペクトルは9月21日に実施した赤道スキャンの際に取得されたものである。このときのイトカワからの距離は約18 km で、NIRS のフットプリントサイズは、小惑星表面上で約30 m である。イトカワの自転周期は約12時間で、この自転周期にあわせた時間の平均になっている。このときの太陽位相角は約8度である。

反射率は幾何学補正を行っていない radiance factor と呼ばれる反射率である。同じ幾何条件に完全拡散反射の表面（ランベルト表面）があった場合に推定されるフラックスに対する観測されたフラックスの割合で定義される。

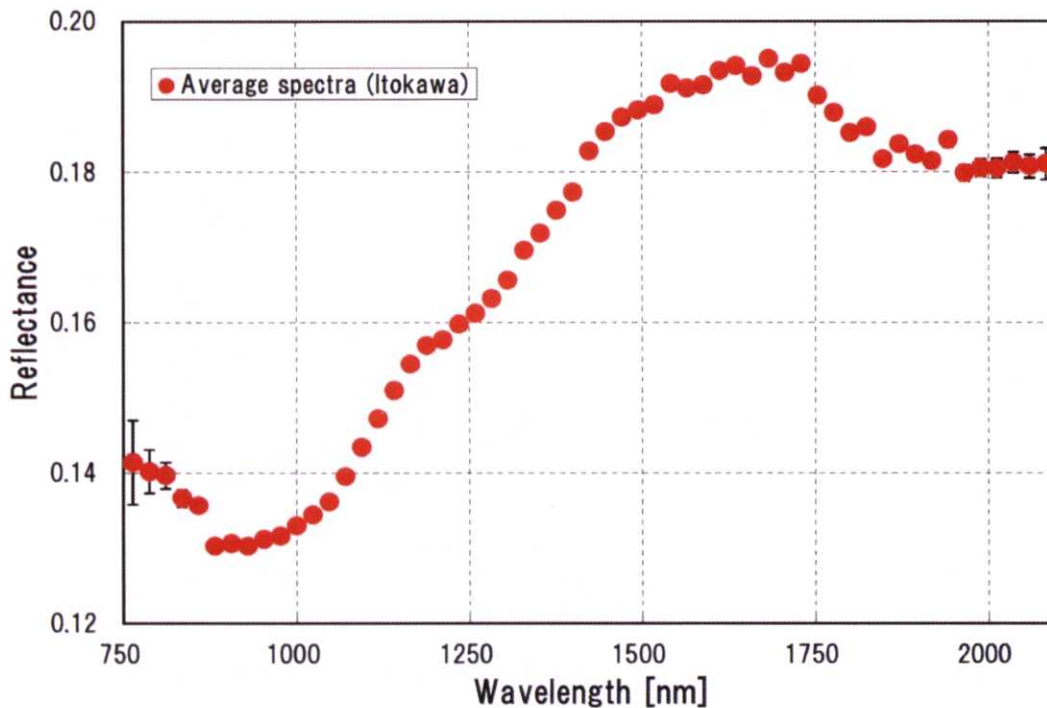


Figure 5-1-1 : Average reflectance spectrum of Itokawa during an equatorial scan on September 21(2395365750-2396761741).

9月21日に実施された赤道スキャンにおけるイトカワの平均反射スペクトル(データファイル2395365750~2396761641の平均。データファイル番号についてはTable A3-2参照)

図のエラーバーの大きさは全平均の分散値ではなく、1回の測定におけるデータの分散値であり、測定系の誤差の大きさを示した。1回の測定は512回（約1分間）のスペクトルデータの平均である。1つのスペクトルデータの積分時間は25.6 msecで、この積分データをシャッターの駆動周期である131.072 msecごとにスタックして、512回分を平均して、1回の出力データとし、トータルの積分時間は実質約13秒である。1回の測定ごとのフットプリントのずれは、1分間の小惑星の自転角度によって決まり、この値は自転角で約0.5度である。イトカワはいびつな形状を持ち、赤道上の長軸半径（約275 m）と短軸半径（約150 m）で約2倍の表面移動速度を持つが、最大移動速度をもつ長軸半径付近（経度0度と180度付近）でも1時間に2.5 m程度で、NIRSのフットプリントサイズより十分小さい。

比較のために主要ケイ酸塩鉱物の反射スペクトルを Figure 5-1-2 に示す。この図を見ても分かるようにイトカワの表面反射スペクトルに輝石やカンラン石の吸収の特徴が表れていることがわかる。

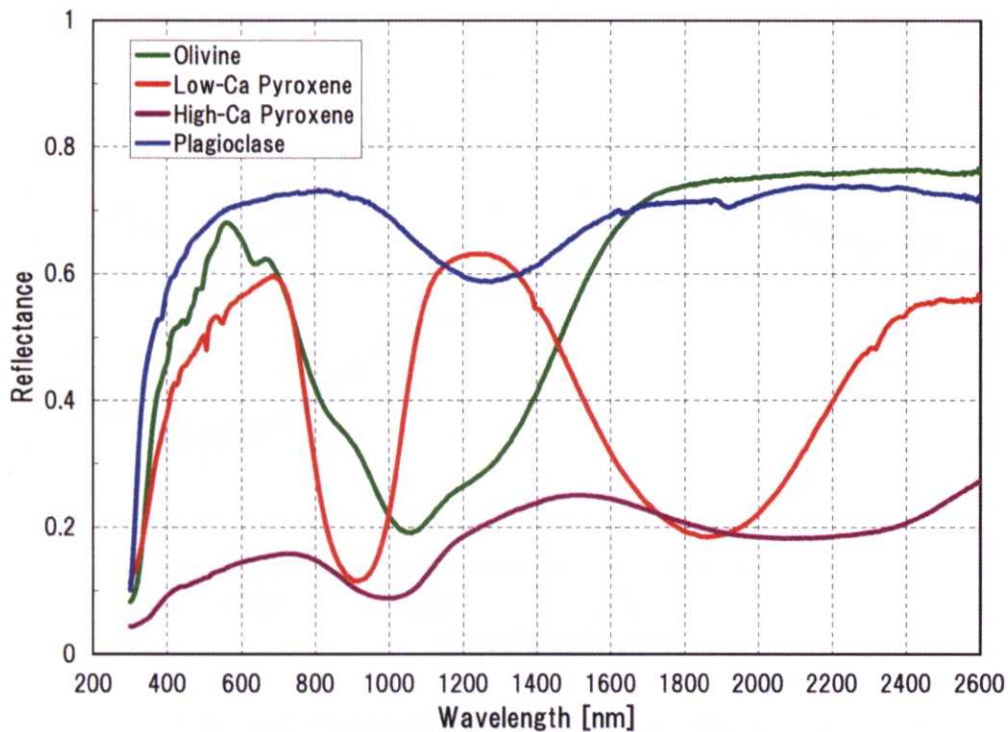


Figure 5-1-2 : The reflectance spectrum of major silicate minerals on asteroid surface. Data from RELAB Public Spectroscopy Database [6]. Data files are CASC02, CBPP47, C1PP49, and C1SC37.

主要ケイ酸塩鉱物の反射スペクトル。データは RELAB Public Spectroscopy Database [6] より。用いたデータファイルは CASC02, CBPP47, C1PP49, C1SC37。

Figure 5-1-3 に 10 月 8 日に実施された赤道スキャンの平均スペクトルを示す。10 月 8 日の探査機のイトカワのからの距離は約 11 km で、太陽位相角は約 30 度である。1 回の測定は 32 回 (約 4 秒) のデータの平均である。2 台目のリアクションホイールの故障以降、探査機の姿勢安定精度が悪くなり、0~0.02deg/s 程度のレートで姿勢が変動している状況であったため、NIRS のフットプリントの移動は、小惑星の自転による表面の移動より、探査機の姿勢変動による移動の方が大きくなった。しかし、4 秒程度の測定期間内であれば、1 回の測定ごとの NIRS のフットプリントのずれは、フットプリントサイズより小さい状況を実現できる。なお、赤道スキャン中に何度か、姿勢が大きく乱れ NIRS のフットプリントが小惑星から外れているときがあるが、そのデータは平均から除外した。

10 月 8 日の平均スペクトルは反射率が 9 月 21 日に比べて低い。これは前章でも述べた太陽位相角による反射率の変化による。

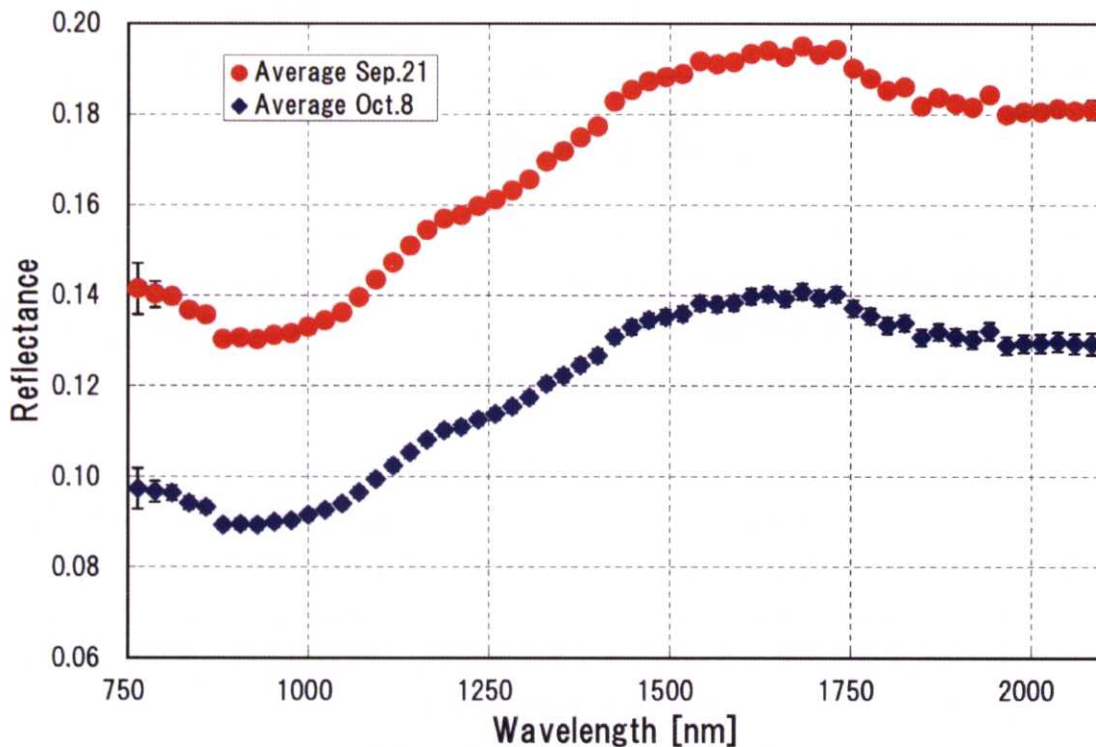


Figure 5-1-3 : Average reflectance spectra of Itokawa during an equatorial scan on September 21 (red) and October 8 (blue).

10 月 8 日の赤道スキャンで得られたイトカワの平均反射スペクトル(青) (9 月 21 日のもの(赤)とあわせて表示)。

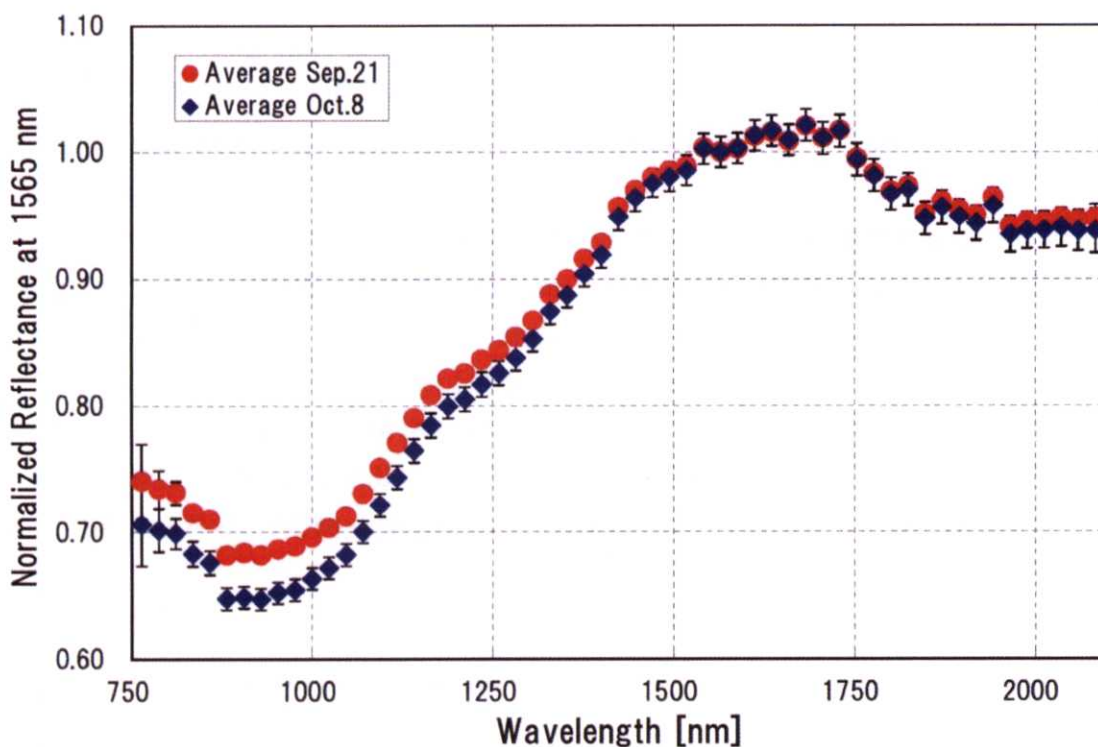


Figure 5-1-4 : Average reflectance spectra of Itokawa during the equatorial scan on September 21 (red) and October 8 (blue). The spectra are normalized at 1565 nm.

1565 nm で規格化したイトカワの平均スペクトル (9月21(赤)と10月8日(青)の赤道スキャンにおける平均スペクトル)

また2つのスペクトルを1565 nmの反射率で規格化したものをFigure 5-1-4に示す。この図を見ると、太陽位相角の違いによって、スペクトルの傾きも変化していることがわかる。これも前章でも述べた通りで、小惑星エロスを探索したニア・シューメーカー探査機に搭載の近赤外線分光器 NIS でも発見された現象である。しかしFigure 5-1-4をみると2 μ m吸収バンドの波長付近では太陽位相角が大きいデータの方が反射率が低い傾向があり、太陽位相角の大きいスペクトルほど単純に右上がりになる(スペクトルが赤くなる)わけではなく、吸収バンド深さが深くなる傾向もあることが分かる。

5-1-2 地上観測データとの比較

次に、これら2つのスペクトルをすでに得られていた地上観測によるイトカワのスペクトルと比較したものが、Figure 5-1-5である(Abe *et al.*, 2006a)。Binzelは2001年3月6日にキットピーク天文台の4 m望遠鏡にRCSP分光器を取り付けて得られた可視域(500-920 nm)のスペクトルと、3月28日にIRTFの望遠鏡にSpeX分光器を取り付けて得

られた近赤外域(800-2500 nm)のスペクトルを観測波長域がオーバーラップするところで、重ねてつなげたもの(Binzel *et al.*, 2001)。Abell は 3 月 23 日に IRTF の望遠鏡に SpeX 分光器を取り付けて得られた近赤外域(700-2500 nm)のスペクトルである(Abell *et al.*, 2006)。3 月 6 日の太陽位相角は 22 度、3 月 23 日の太陽位相角は 48 度、3 月 28 日の太陽位相角は 66 度であった。

NIRS で得られたスペクトルと地上観測で得られたスペクトルを比較すると、どの波長で規格化するかによって印象は違うが、900 nm より短い波長と 1700 nm 付近で多少違いがあるが、全体的にはよく一致している。違いの原因は地上試験で得られた較正式に未知の誤差があることが考えられるが、地上観測同士でもかなり結果が違っていること、また、地上観測と NIRS の観測で太陽位相角などの観測条件が異なっていたり、地上観測は全球平均なのに対して、NIRS は赤道スキンの平均であり、観測領域が異なっていることも原因として考えられる。NIRS の感度校正の式の検証については次の 5-2 章で議論する。

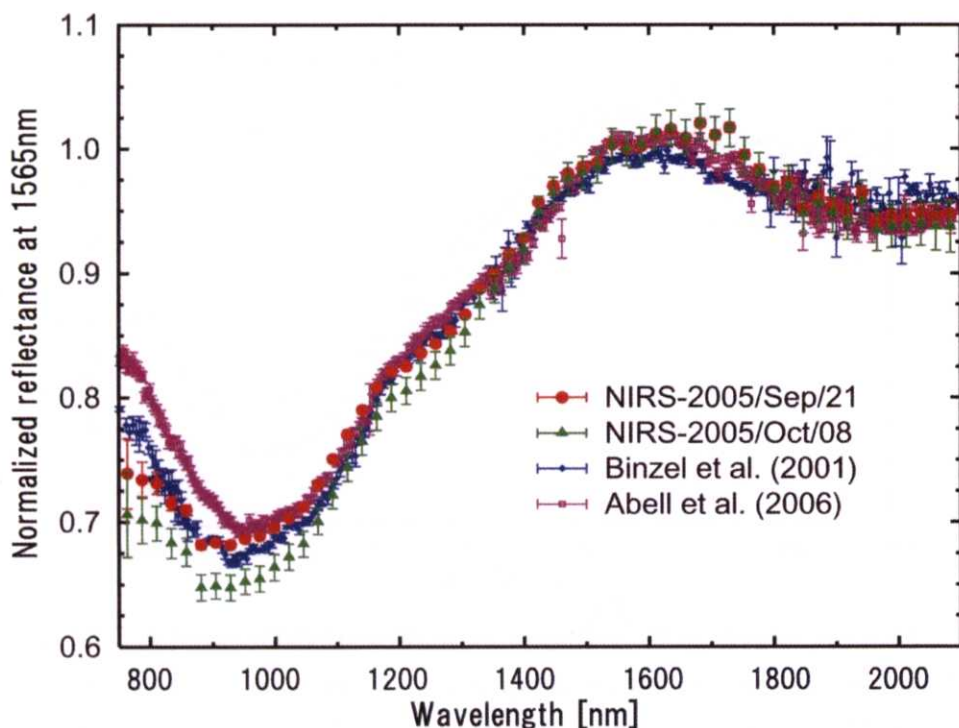


Figure 5-1-5 : Equatorial averaged spectra of Itokawa observed on September 21 (red) and October 8 (green). Also plotted are two independent ground-based disk-integrated spectra (from Binzel *et al.* (2001) (blue), and Abell *et al.* (2006) (purple)).

NIRS で得られたイトカワの平均スペクトル(9月21日(赤)、10月8日(緑))と地上観測結果(Binzel *et al.* (2001)(青)、Abell *et al.* (2006)(紫))の比較。

5-2 NIRS の感度較正式の検証

5-2-1 観測条件の違いの影響

NIRS で得られた平均スペクトルと地上観測で得られた反射スペクトルの違いの原因について議論するために、観測条件を同じにしたスペクトルで比較することを考える。

地上観測データについては、太陽位相角ができるだけ小さな条件で取得したデータとして2001年3月12日に観測したデータを用いる。データは Abell *et al.* (2006)の生データを提供してもらい、NIRS と同じ観測波長域の反射率に補間した。一方 NIRS の観測データについては、Kitazato *et al.* (2006)によって推定された Hapke のパラメータを用いて、地上観測と同じ観測条件で観測した場合の反射スペクトルを推定した。両者の結果を Figure 5-2-1 に示し、両者の比を Figure 5-2-2 に示す。なお、Figure 5-2-2 を作成する際に地上観測のデータについては 1400 nm 付近と 2000 nm 付近のノイズを除去するためにスムージング処理を行っている。

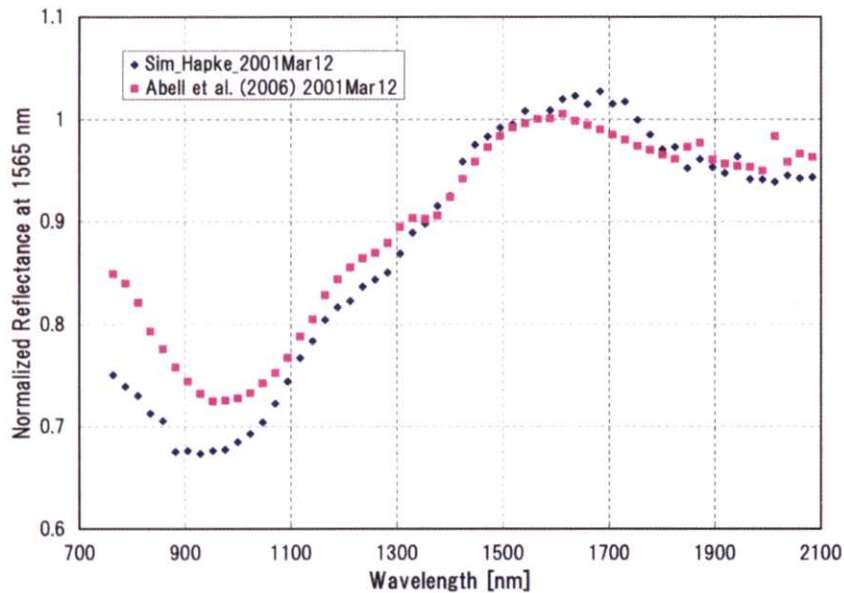


Figure 5-2-1 : Comparison between simulated spectra using Hapke parameter obtained by NIRS observation on the condition of the groundbased observation at 2001 March 12 (blue) and the spectra obtained by groundbased observation at 2001 March 12 (pink). The spectra of groundbased observation are calculated by interpolation at the wavelength of NIRS observation.

NIRS の観測で得られた Hapke パラメータを用いて 2001 年 3 月 12 日の地上観測の条件に合わせて計算したイトカワの反射スペクトル(青)と地上観測で得られた反射スペクトル(ピンク)の比較。地上観測のスペクトルは NIRS の観測波長と同じ波長での値を補間によって計算して求めている。

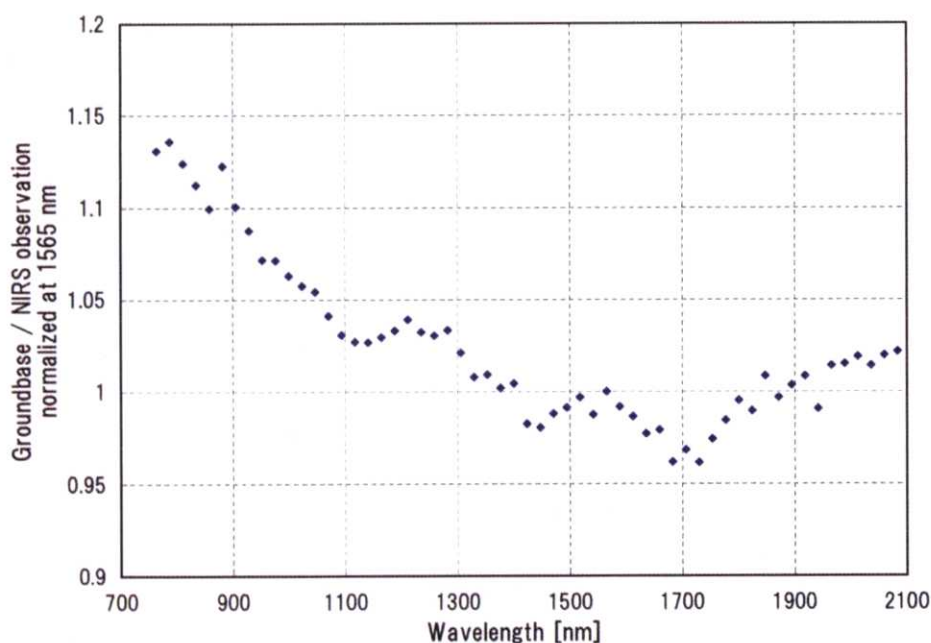


Figure 5-2-2 : Ratio of groundbased spectra and simulated spectra using Hapke parameter obtained by NIRS shown in Figure 5-2-2.

地上観測スペクトルと NIRS の観測で得られた Hapke パラメータを用いて求めたスペクトルの比

ここでは、NIRS で得られた Hapke パラメータがイトカワの表面で同じであると仮定しているが、観測条件をそろえることで地上観測と NIRS で得られたスペクトルの違いは±10%以内であることがわかる。しかし、短波長ほど地上観測の反射率の方が高くなる傾向があり、その原因について考察する。

5-2-2 月観測データを用いた検証

NIRS はクルージング中に月の裏側の観測を実施しており、まったく同一地点の反射スペクトルデータは他の観測ではまだ得られていないが、観測地点は月の高地であり、アポロ 16 号の着陸地点のサンプルの反射スペクトルと同じであると仮定すると、比較することが可能である。アポロ 16 号の着陸地点のサンプルの実験室での測定条件と NIRS 観測時の測定条件は多少異なるが、位相角条件は 3-5 章でも述べたように 0.3 度以内で一致しているため、幾何学補正は行わない。両者の比を Figure 5-2-3 に示す。短波長ほど比が大きくなる傾向は同じであるがその程度はかなり違うことがわかる。しかし 880 nm 付近や、1450 nm 付近および 1700 nm 付近の感度の細かい変化の傾向は一致しており、この部分に関しては地上較正データにおける未知の誤差が原因であると考えられる。Figure 5-2-2 と Figure 5-2-3 の比をとったものを Figure 5-2-4 に示す。

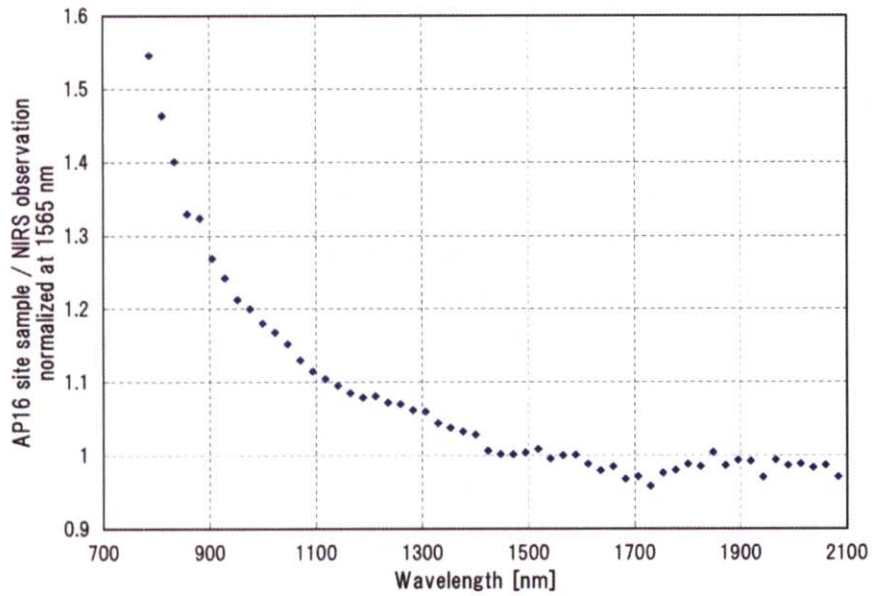


Figure 5-2-3 : Ratio of Apollo 16 site sample spectra and lunar far side spectra observed by NIRS shown in Figure 3-5-5.

アポロ 16 号着陸点サンプルの反射スペクトルと NIRS の観測で得られた月の裏側の反射スペクトルの比

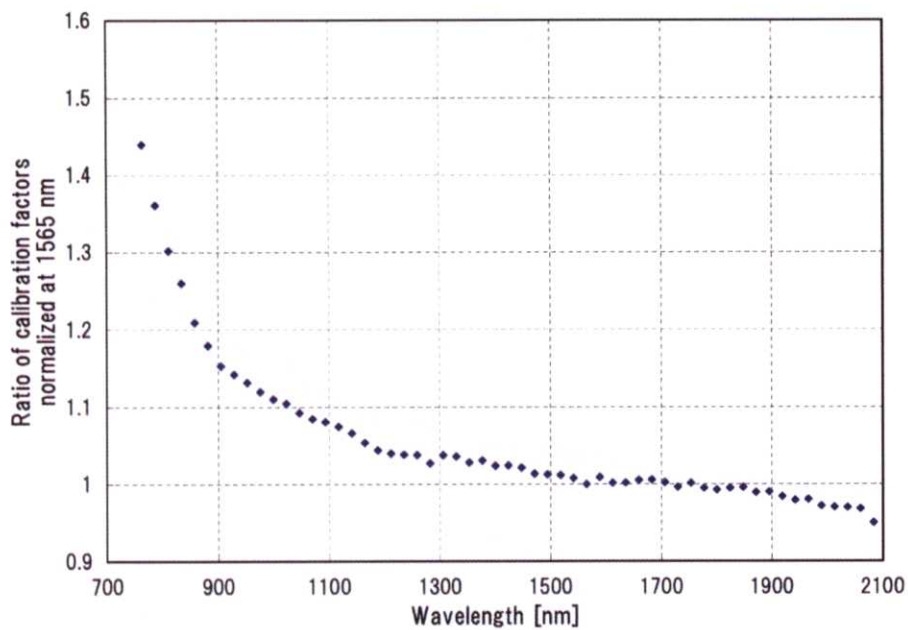


Figure 5-2-4 : Ratio of calibration factors at Figure 5-2-2 and Figure 5-2-3.

Figure 5-2-2 と 5-2-3 で得られた calibration factor の比

5-2-3 クルーミング中の感度変化の影響

一方、打ち上げ後、継続的にモニタしているランプ校正データによると、月観測前後のランプデータとイトカワ観測時のランプデータの出力変化は Figure 5-2-5 に示した特徴を持つ。ランプ出力は短波長側では時間がたつにつれて増加する傾向にある。光学系透過率低下やランプの性能劣化では出力が減少する傾向になると考えられるため、それ以外の原因であると推定される。可能性としては光学系の経時的な変形による検出器面でのスポットの位置変化が考えられる。イトカワ観測時と月観測時の比較を行うためには、その間の感度変化を考慮する必要がある、Figure 5-2-4 の値を Figure 5-2-5 で割った結果を Figure 5-2-6 に示す。Figure 5-2-6 で示されるこの違いは 3-5 章でも少しふれたように、NIRS で観測した月の裏側の地域とアポロ 16 号着陸地点の宇宙風化の進行度の違いか、ランプデータのモニタで考慮できていない NIRS の感度変化が原因と考えられる。

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

Figure 5-2-6 の傾向が宇宙風化の進行度の違いでどの程度説明できるかを定量的に議論する。ここでは宇宙風化のモデルとして Hapke (2001) のモデルを採用する。

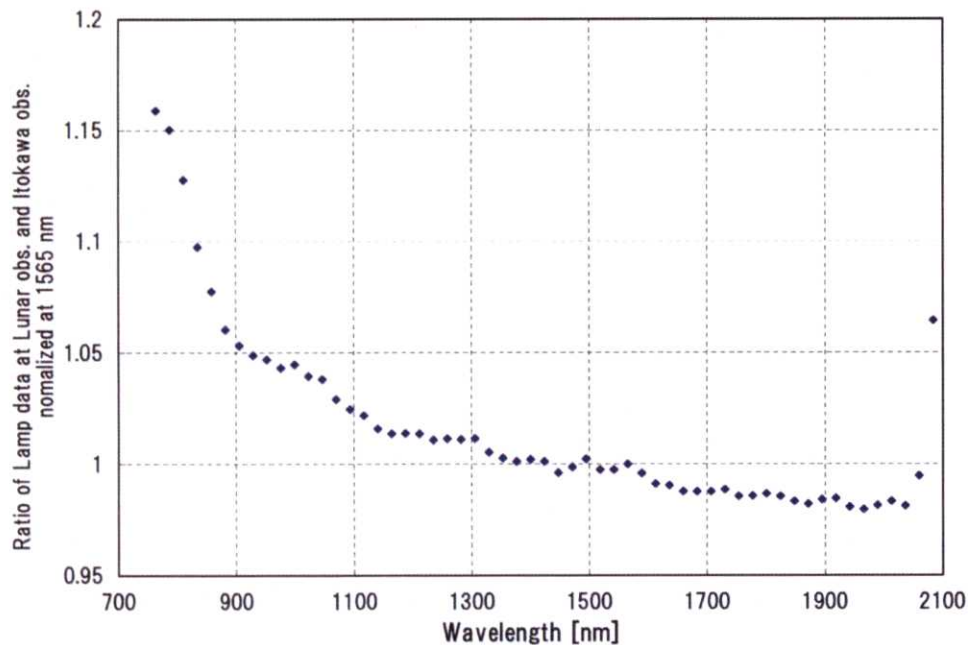


Figure 5-2-5 : Ratio of Lamp data at Lunar observation (2004 April 7 and July 17) and Itokawa observation (2005 September 4 and October 30) normalized at 1565 nm.

ランプデータの出力の変化。月観測時(2004年4月7日と7月17日の平均)とイトカワ観測時(2005年9月4日と10月30日の平均)の比較。1565 nm で規格化してある。

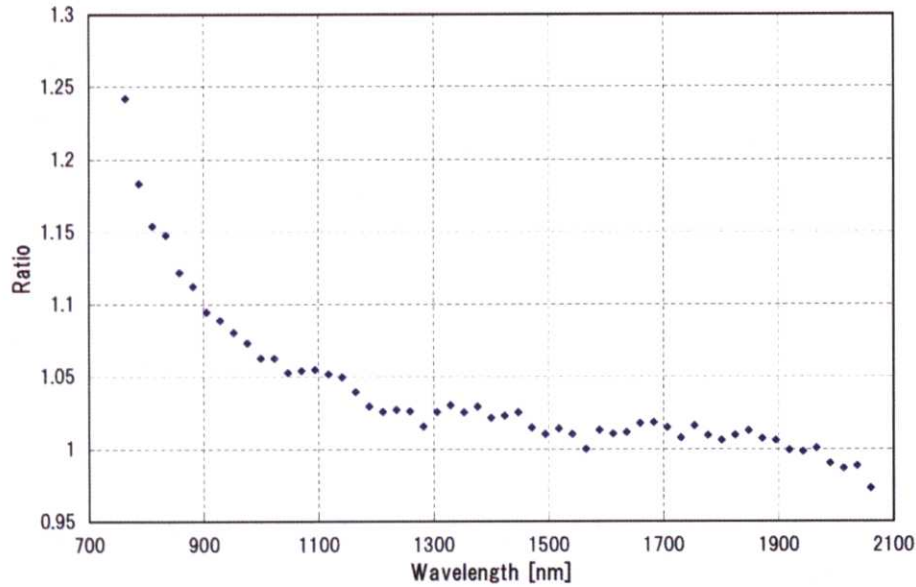


Figure 5-2-6 : Ratio between data of Figure 5-2-4 and data of Figure 5-2-5.

Figure 5-2-4 と Figure 5-2-5 の比

天体表面のレゴリス粒子の吸収係数を α_h とし、宇宙風化により生成される微小金属鉄粒子の吸収係数を α_{Fe} とすると、宇宙風化を受けた天体表面層のレゴリス粒子の吸収係数 α_w は、

$$\alpha_w = \alpha_h + \alpha_{Fe}.$$

と表すことができる。ここで、

$$\alpha_{Fe} = (36 \cdot \pi / \lambda) \cdot \varphi \cdot z(\lambda).$$

であり、 λ は波長、 φ はレゴリス粒子に対する微小金属鉄粒子の体積割合であり、 $z(\lambda)$ は、

$$z(\lambda) = (m_h^3 \cdot m_{Fe} \cdot k_{Fe}) / \{(m_{Fe}^2 - k_{Fe}^2 + 2 \cdot m_h^2) + (2 \cdot m_{Fe} \cdot k_{Fe})^2\}.$$

である。ここで m_h はレゴリス粒子の屈折率の実部、 m_{Fe} 、 k_{Fe} は微小金属鉄粒子の屈折率の実部と虚部である。 m_h の値は Pieters *et al.* (2000) による宇宙風化の議論で採用しているように 1.70 の固定値をここでも採用し、 m_{Fe} 、 k_{Fe} の値は Johnson and Christy (1974) による測定結果を参考にして、固定値および一次関数で表現し、Figure 5-2-7 に示した値を採用した。

ここで、反射光のレゴリス粒子における平均的な透過距離を d_e とすると、反射光強度 $R(\lambda)$ は

$$\ln R(\lambda) = - \{ \alpha_h(\lambda) + (36 \cdot \pi / \lambda) \cdot \varphi \cdot z(\lambda) \} \cdot d_e.$$

と表せる。

アポロ 16 号サイトのサンプルの反射率を $R_1(\lambda)$ とし、NIRS で観測した月の裏側の反射率を $R_2(\lambda)$ として、両者の宇宙風化の進行度の違いが微小金属鉄粒子の体積割合の差 $\Delta\varphi$ として表れるとすると、

$$\ln (R_1(\lambda) / R_2(\lambda)) = - (36 \cdot \pi / \lambda) \cdot \Delta\varphi \cdot z(\lambda) \cdot d_e.$$

となる。

Figure 5-2-8 に d_e を 100 μm と仮定して、 $\Delta\varphi$ を 0.01 と 0.015% とした場合の計算結果を、Figure 5-2-6 に示した比とあわせて記す。月の表面のレゴリスにおける d_e の仮定が正しいとすると、アポロ 16 号サイトと NIRS で観測した月の裏側の宇宙風化進行度の違いは微小金属鉄粒子の体積割合の差としては、0.01~0.015% 程度であると考えることができる。

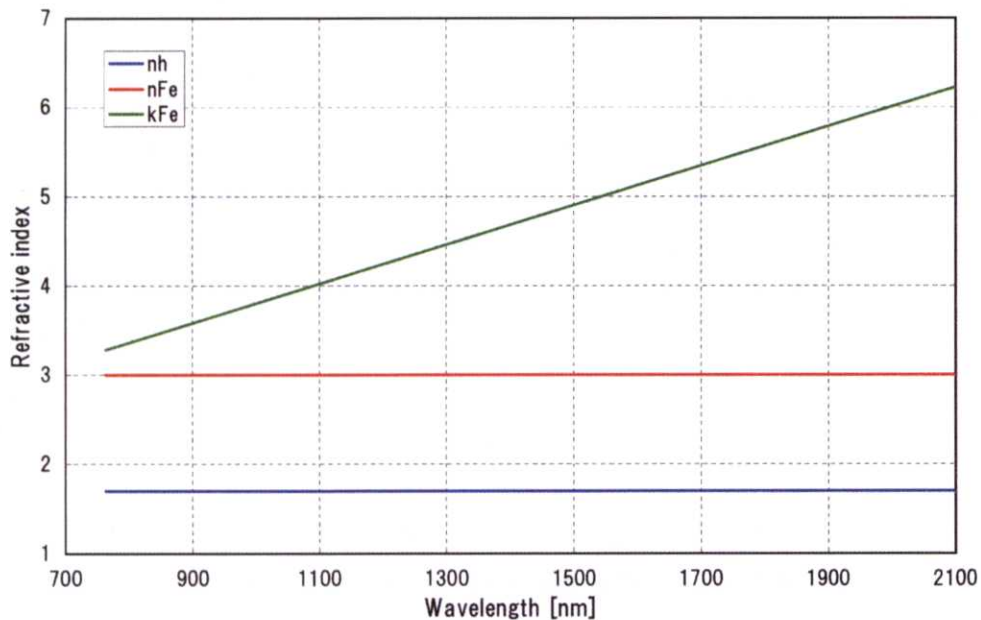


Figure 5-2-7 : Real (n) and imaginary (k) part of the refractive index of host material (h) and nano-phase metallic iron (Fe). Data is referred from Pieters *et al.* (2000) and Johnson and Christy (1974).

計算で用いたレゴリス粒子(h)と微小金属鉄粒子(Fe)の複素屈折率の実部(n)と虚部(k)。データは Pieters *et al.* (2000) と Johnson and Christy (1974)を参考にした。

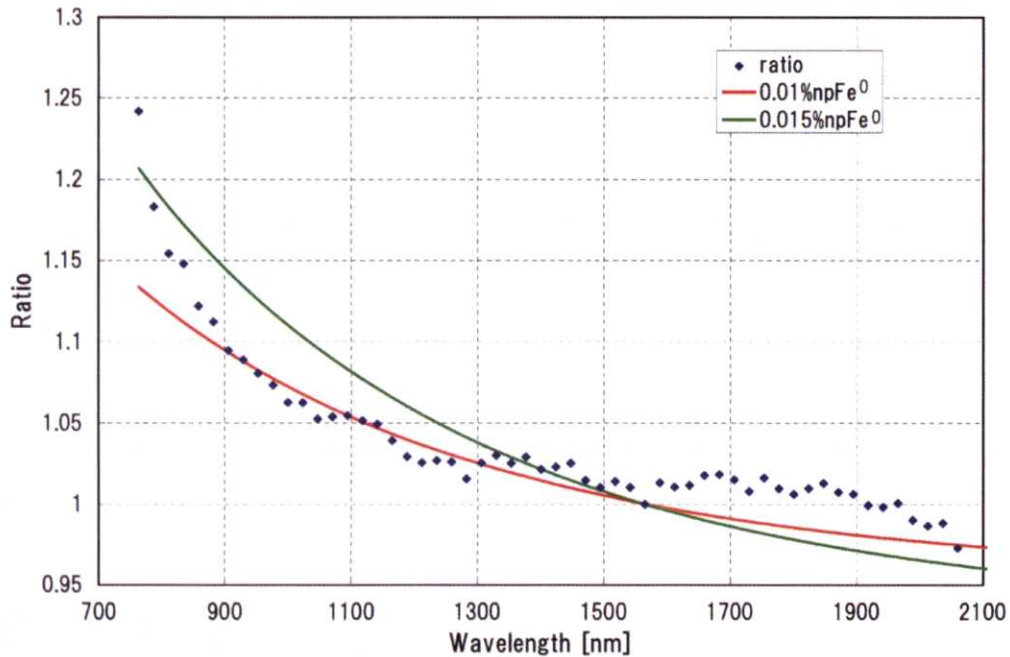


Figure 5-2-8 : Ratio between reflectance spectrum observed by NIRS and laboratory measured spectrum of Apollo 16 site sample (blue). Also plotted model curves considering space weathering (differences of volume fraction of nano-phase iron are 0.010 % (red) and 0.015% (green)).

NIRSで観測した月の裏側の反射スペクトルとアポロ16号着陸地点サンプルの反射スペクトルの比(青)。両者の違いを宇宙風化作用の進行度の差による微小金属鉄粒子の体積割合の差であると仮定した場合の、モデル計算結果(赤：0.010%、緑：0.015%)。

5-2-5 イトカワ滞在中の感度変化の影響

以上、月観測時とイトカワ観測時で用いたNIRSの感度較正式は、Figure 5-2-5で示す程度の違いがあるものの、880 nm付近や、1450 nm付近および1700 nm付近の感度の細かい変化の傾向は一定で、打ち上げ後の感度の変化についてはランプデータのモニタで評価できると考えられる。

イトカワ滞在中のランプデータの変化についてFigure 5-2-9にまとめる。イトカワ滞在中にはNIRSの感度の変化は±2%程度であることがわかる。したがって、相対的なスペクトル変化については同じ感度較正データを用いて評価して問題ないと言える。

Figure 5-2-2で示した補正係数をNIRSの感度較正データに施すことで、2001年3月12日の観測データに合わせることは可能である。この補正係数が他の観測条件でも使用可能かを検証するために、2001年3月23日と3月24日の地上観測データに補正係数を用いて

NIRS データを推定し、NIRS の観測で得られた Hapke パラメータを用いて推定したスペクトルを比較した結果を Figure 5-2-10 と Figure 5-2-11 に示す。こちらも±2%程度の誤差で一致しており、観測条件が異なっても補正係数は有効であることがわかる。

地上観測データによる NIRS の感度データの較正は以上の議論で有効であるが、反射率の絶対値についての議論はできない。またイトカワ滞在中のデータについては相対的な感度の変化がないことから、本論文では Figure 5-2-2 で示した程度の違いがあることに注意しながら、打ち上げ前の感度較正式を使うこととする。

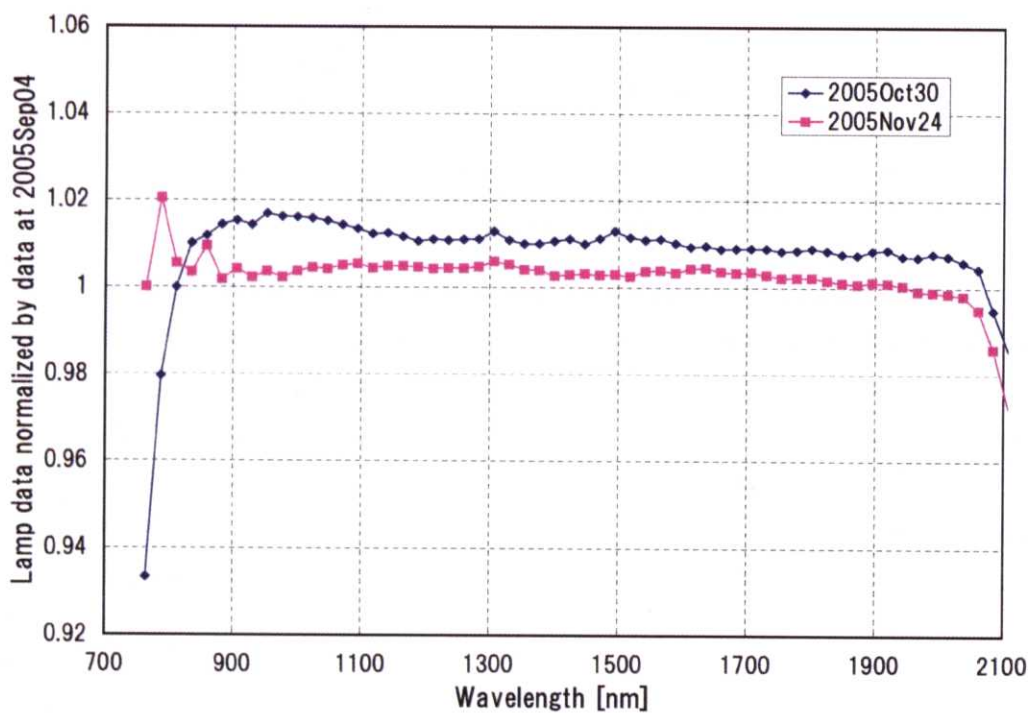


Figure 5-2-9 : Lamp data (2005 October 30 (blue) and 2005 November 24 (pink)) normalized the data obtained just before arrival at Itokawa (2005 September 4).

イトカワ滞在中に取得したランプデータ(2005年10月30日(青)、2005年11月24日(ピンク))の変化(イトカワ到着直前(2005年9月4日)に取得したデータで規格化)。

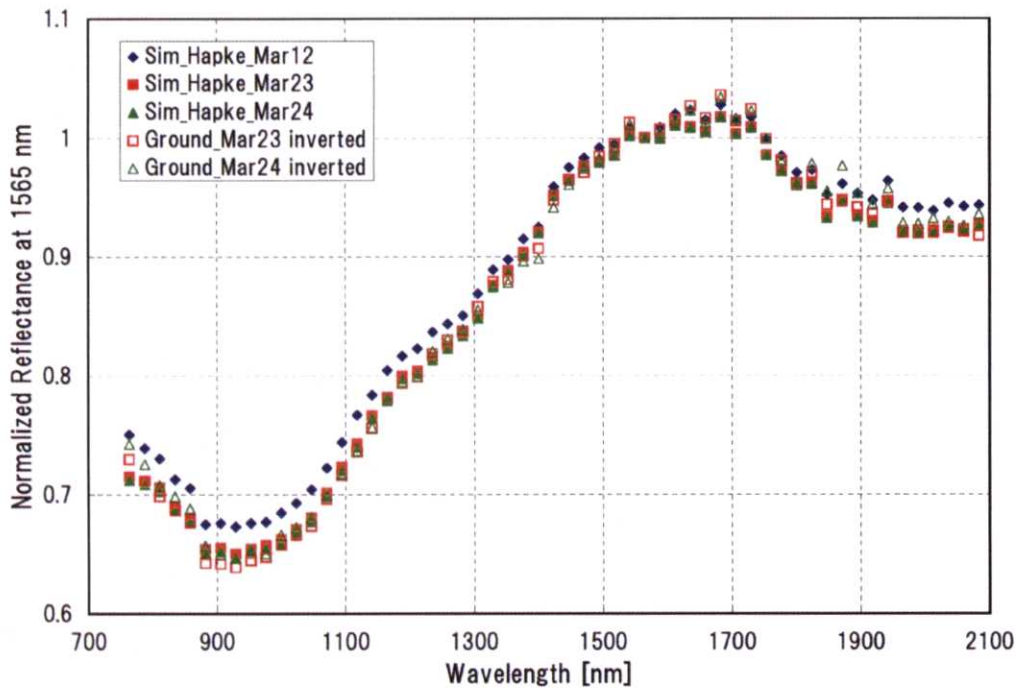


Figure 5-2-10 : Simulated spectra using Hapke parameter obtained by NIRS observation on the condition of the groundbased observation at 2001 March 12 (blue), 23(red), and 24(green). Open square and triangle data are inverted spectrum of groundbased data using correction factor shown in Figure 5-2-2.

NIRS で得られた Hapke パラメータを用いて、計算した地上観測取得時の条件での反射スペクトル(2001年3月12日(青)、3月23日(赤)、3月24日(緑))。白抜きデータのは地上観測データを Figure 5-2-2 の補正係数を用いて変換して NIRS データと比較できるようにしたもの。

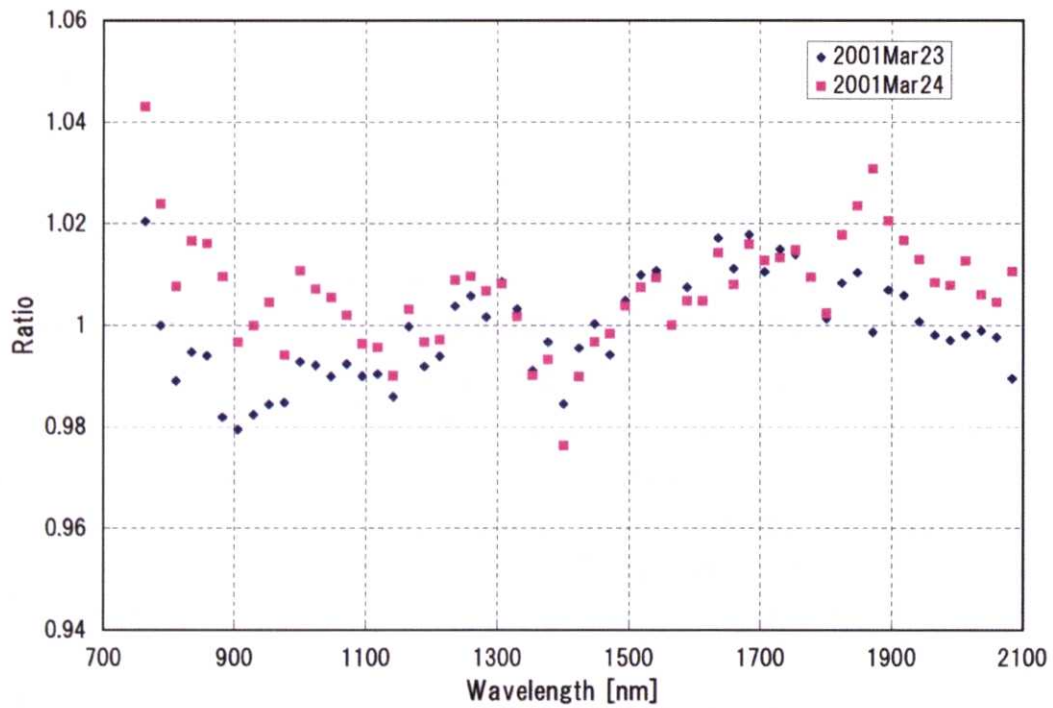


Figure 5-2-11 : Ratio between groundbased data at 2001 March 23 (blue) and 24 (pink) and NIRS data corrected by correction factor shown at Figure 5-2-10.

Figure 5-2-10 の 3 月 23 日と 24 日のデータについて、Figure 5-2-2 の補正係数を用いて逆変換した地上観測スペクトルの比 (3 月 23 日(青)、3 月 24 日(ピンク))。

5-3 吸収係数強度比による鉱物種推定

5-3-1 鉱物種の推定方法

次に NIRS で得られたスペクトルの特徴から、イトカワ表面の鉱物種や対応する隕石種について推定する方法について考える。

惑星の反射スペクトルは $1\mu\text{m}$ 付近と $2\mu\text{m}$ 付近に特徴的な吸収バンドを持つが、これらは Figure 5-1-2 にも示したように、さまざまな鉱物に対応する吸収バンドが重なっており、これらの複合吸収帯から惑星の表面に存在する鉱物種を推定する方法として、これまでいくつかの手法が提案されている。その一つは、Modified Gaussian Model (MGM) 法と呼ばれる方法(Sunshine *et al.*, 1990)で、 $1\mu\text{m}$ バンドおよび $2\mu\text{m}$ バンドを複数の吸収バンドに分解して表現して評価する方法である。他にはエンドメンバーを仮定した mixing model によって、エンドメンバーの存在比を推定する方法 (Hapke, 1993)、また $1\mu\text{m}$ バンドおよび $2\mu\text{m}$ バンドの中心波長や、反射スペクトルにおける吸収バンドの面積比などから推定する方法(Cloutis *et al.*, 1986)などもある。

輝石とカンラン石の存在比を推定する場合、最も簡便な方法は $1\mu\text{m}$ バンドおよび $2\mu\text{m}$ バンドの面積比から推定する方法である。これは $1\mu\text{m}$ バンドが輝石とカンラン石の両方の吸収バンドを含むのに対して、 $2\mu\text{m}$ バンドは輝石に関連する吸収バンドしか含まないからである。しかし、NIRSの観測波長域は長波長側が 2100 nm までしか観測データがなく、 $2\mu\text{m}$ バンドは 2500 nm 付近まで続くため、 $2\mu\text{m}$ バンドの面積を推定するのが難しい。

MGM 法は $1\mu\text{m}$ バンドに限った議論をすることができ、たとえば $1\mu\text{m}$ バンドを 3 つ以上の吸収バンドに分解することができれば、その強度比や中心波長から鉱物の化学組成(Sunshine and Pieters, 1998) や対応隕石種との議論(Binzel *et al.*, 2001)が可能であるが、実際は $1\mu\text{m}$ バンドにはカンラン石に関する吸収バンドが 3 つ、輝石に関係する吸収バンドが 1 つ以上存在し、それらを分解しなければならず、推定が難しいのが現状である。

mixing model については、そのエンドメンバーを仮定すれば、それらの存在比の最適値を推定することは可能であるが、エンドメンバーをどう仮定するかの問題が残る。

そこで、本研究では、上記のような問題を回避し、かつ簡便な方法として、 $1\mu\text{m}$ の吸収バンドのなかの 3 つの波長についての吸収係数の強度を求め、その強度比から鉱物組成比を推定し、対応隕石種についての議論をすること考える。

5-3-2 解析に用いたスペクトルデータ

議論に用いる鉱物混合物および隕石のスペクトルデータについては、RELAB データベースにあるもの、およびブラウン大の廣井孝弘氏に測定して提供していただいたデータを用いた。用いたスペクトルデータについて Table 5-3-1 にまとめる。またそれぞれのスペクト

ルを Figure 5-3-1~Figure 5-3-6 に示す。

Table 5-3-1 : Spectra data file name

解析に用いた反射スペクトルデータ

Sample	Particle size (μm)	Sample-ID	Comments	Ref.	RELAB File ID
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 20	0-25	XT-TXH-47	Ol:Px:Pl=1:4:1 Ol/(Ol+Px)=20%	1	C1XT47
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 50	0-25	XT-TXH-53	Ol:Px:Pl=5:5:2 Ol/(Ol+Px)=50%	1	C1XT53
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 71	0-25	XT-TXH-51	Ol:Px:Pl=5:2:5 Ol/(Ol+Px)=71%	1	C1XT51
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 80	0-25	XT-TXH-48	Ol:Px:Pl=4:1:1 Ol/(Ol+Px)=80%	1	C1XT48
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 20	45-75	XT-TXH-34	Ol:Px:Pl=1:4:1 Ol/(Ol+Px)=20%	1	C1XT34
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 50	45-75	XT-TXH-39	Ol:Px:Pl=5:5:2 Ol/(Ol+Px)=50%	1	C1XT39
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 71	45-75	XT-TXH-38	Ol:Px:Pl=5:2:5 Ol/(Ol+Px)=71%	1	C1XT38
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 75	45-75	XT-TXH-32	Ol:Px:Pl=3:1:0 Ol/(Ol+Px)=75%	1	C1XT32
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 80	45-75	XT-TXH-33	Ol:Px:Pl=4:1:1 Ol/(Ol+Px)=80%	1	C1XT33
Athens(LL6)	0-125	OC-TXH-013-C			C1OC13C
Athens(LL6)	125-250	OC-TXH-013-B			C1OC13B
Cherokee Springs(LL6)	0-125	OC-TXH-001-C	Ol/(Ol+Px)=68%	2	C1OC01C
Cherokee Springs(LL6)	125-250	OC-TXH-001-B	Ol/(Ol+Px)=68%	2	C1OC01B
Alta'ameem(LL5)	0-125	OC-TXH-010-C	Ol/(Ol+Px)=70%	3	C1OC10C
Alta'ameem(LL5)	125-250	OC-TXH-010-B	Ol/(Ol+Px)=70%	3	C1OC10B
Chateau Renard(L6)	0-125	OC-TXH-011-C			C1OC11C
Chateau Renard(L6)	125-250	OC-TXH-011-B			C1OC11B
Harleton(L6)	0-125	OC-TXH-003-C			C1OC03C
Harleton(L6)	125-250	OC-TXH-003-B			C1OC03B
Cynthiana(L4)	0-125	OC-TXH-015-C			C1OC15C
Cynthiana(L4)	125-250	OC-TXH-015-B			C1OC15B
Dwaleni(H6)	25-250	MB-CMP-003-L	Ol/(Ol+Px)=53%	2	CLMB03
Portales Valley(H6)	20-250	MT-DTB-057			C1MT57
Magombedze(H5)	0-150	TB-TJM-108	Ol/(Ol+Px)=56%	4	C1TB108
Ucera(H5)	20-250	MH-CMP-006	Ol/(Ol+Px)=54%	2	C1MH06
Kabo(H4)	0-150	TB-TJM-136	Ol/(Ol+Px)=51%	2	C1TB136
Ourique(H4)	0-150	MT-DTB-008			C1MT08
Lodran(Lod)	0-125	TB-TJM-041			C1TB41
Acapulco(Aca)	0-125	TB-TJM-043	Ol/(Ol+Px)=52%	4	C1TB43
ALHA81261(Aca)	0-125	TB-TJM-039			C1TB39
EET99402(Bra)	0-125	TB-TJM-058			C1TB58
Reid013(Bra)	0-45	MT-TXH-052-A			CAMT52
Hughes026(Bra)	0-45	MT-TXH-051-A			CAMT51
Brachina(Bra)	0-45	MT-TXH-049-A			CAMT49

※測定は 30 度入射、0 度反射で測定、データは全て RELAB Public Spectroscopy Database [6]より。RELAB File ID が C1OC で始まるデータは廣井氏より提供された。輝石・カンラン石存在比のデータは以下の文献より参照した。Ref.1: Hiroi and Pieters (1994), Ref.2: McSween and Bennett III (1991), Ref.3: Al-Bassam (1978), Ref.4: Burbine *et al.* (2003a)

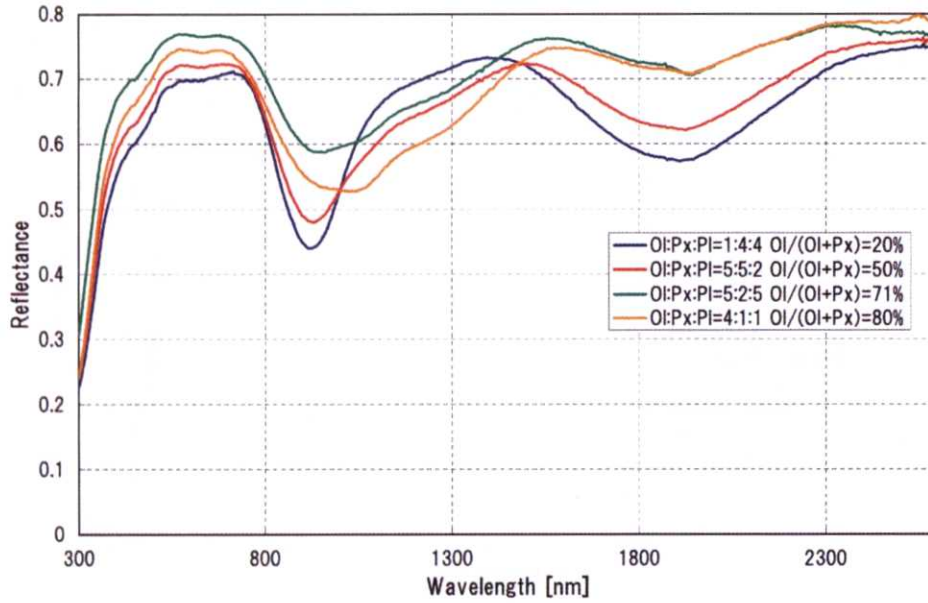


Figure 5-3-1 : Reflectance spectra of olivine-pyroxene-plagioclase mixtures (Particle size < 25 μm). Data files are listed in Table 5-3-1.

カンラン石・輝石・斜長石混合物の反射スペクトル (粒子サイズ<25 μm)。データは Table 5-3-1 参照。

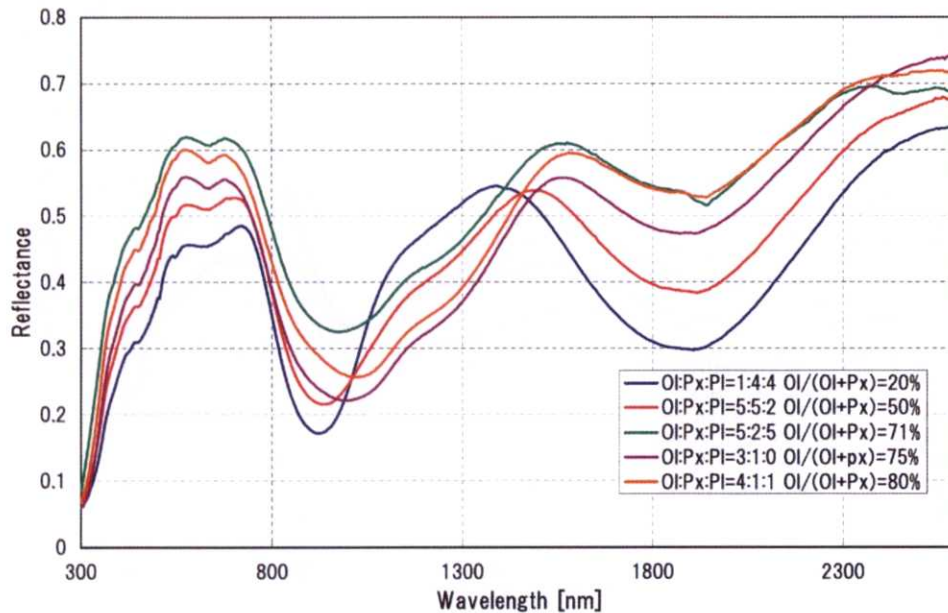


Figure 5-3-2 : Reflectance spectra of olivine-pyroxene-plagioclase mixtures (Particle size 45 - 75 μm). Data files are listed in Table 5-3-1.

カンラン石・輝石・斜長石混合物の反射スペクトル (粒子サイズ 45 - 75 μm)。データは Table 5-3-1 参照。

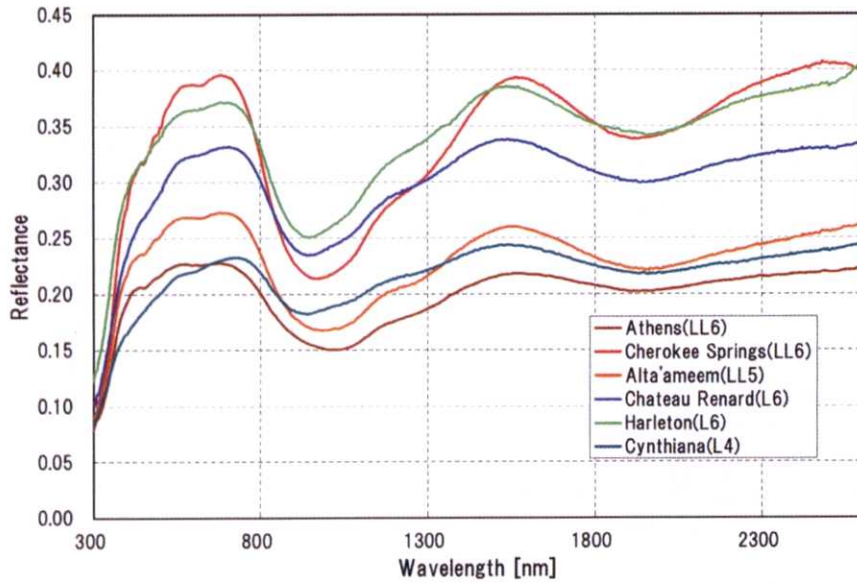


Figure 5-3-3 : Reflectance spectra of L-LL ordinary chondrites (Particle size 0 - 125 μm). Data files are listed in Table 5-3-1.

L-LL 普通コンドライトの反射スペクトル (粒子サイズ 0 - 125 μm)。データは Table 5-3-1 参照。

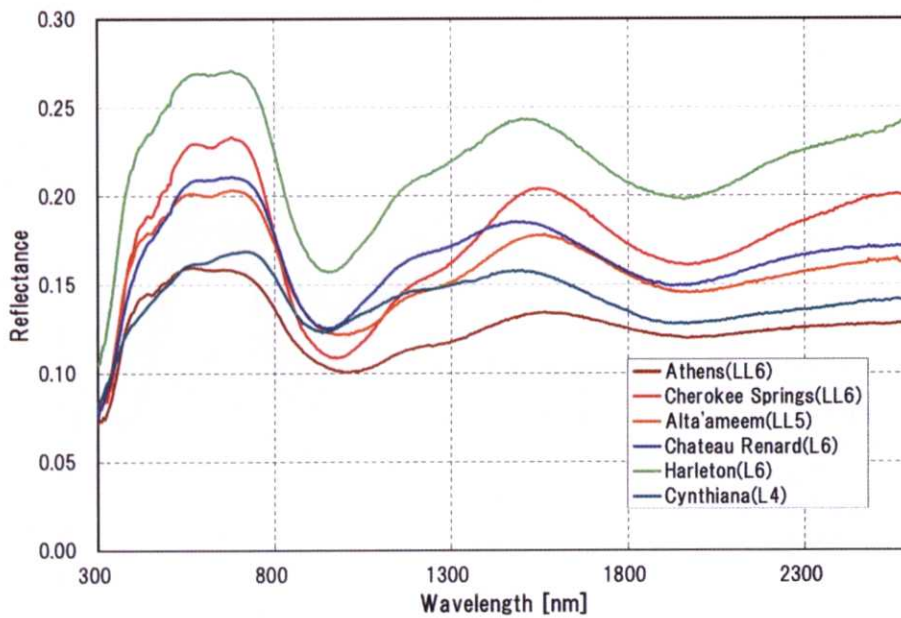


Figure 5-3-4 : Reflectance spectra of L-LL ordinary chondrites (Particle size 125 - 250 μm). Data files are listed in Table 5-3-1.

L-LL 普通コンドライトの反射スペクトル (粒子サイズ 125 - 250 μm)。データは Table 5-3-1 参照。

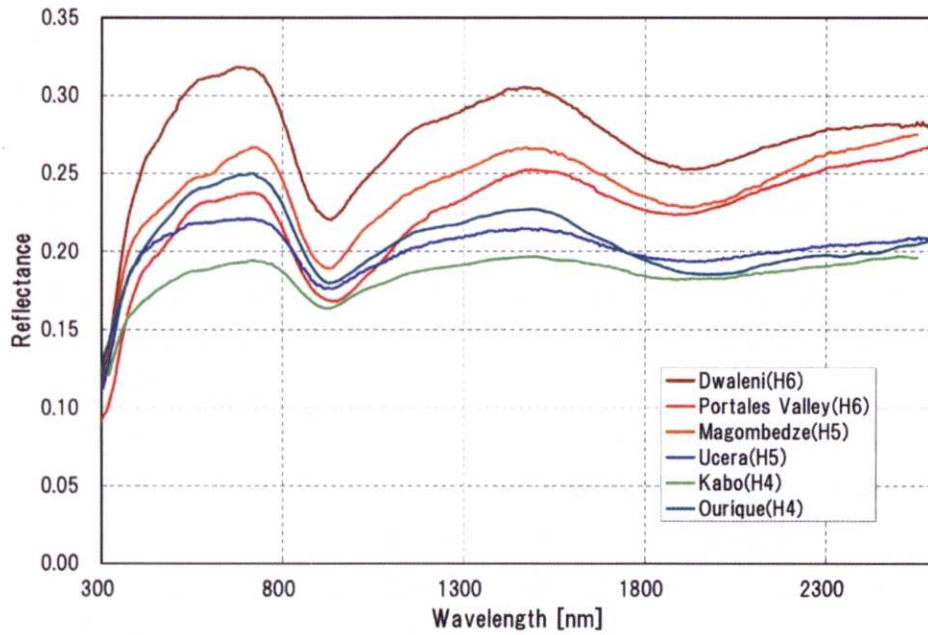


Figure 5-3-5 : Reflectance spectra of H ordinary chondrites. Data files are listed in Table 5-3-1.

H 普通コンドライトの反射スペクトル。データは Table 5-3-1 参照。

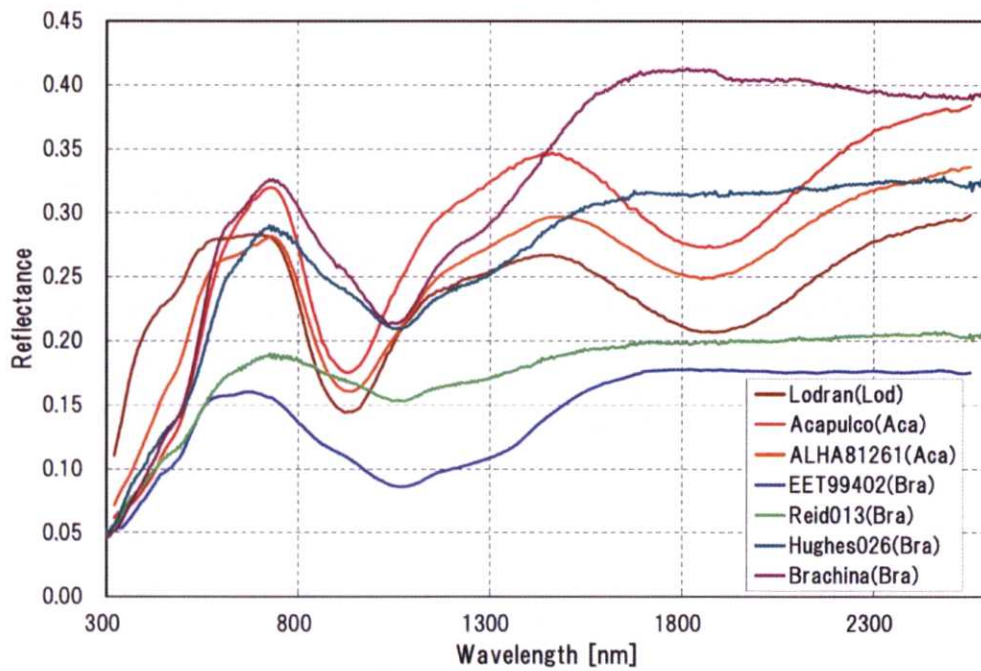


Figure 5-3-6 : Reflectance spectra of primitive achondrites. Data files are listed in Table 5-3-1.

原始的エイコンドライトの反射スペクトル。データは Table 5-3-1 参照。

5-3-3 反射スペクトルの特徴の抽出

Table 5-3-1 に示したデータを用いて、反射スペクトルの特徴を求める。はじめにスペクトルからコンティニューム成分を取り除く。コンティニュームの決め方としては、一番単純には、吸収バンドの肩を直線で結ぶ方法であるが、ここでは Sunshine *et al.* (1990) などで行われている手法にならって、反射率の自然対数を取り、吸収バンドの肩に接する強度が波長の逆数に比例する曲線とする方法を採用する。各スペクトルにおいて求めた吸収バンドの肩を Table 5-3-2 にまとめる。スペクトル解析の例として反射率の対数と求めたコンティニュームの結果を Figure 5-3-7 に示す。

Figure 5-3-7 において、コンティニュームと自然対数をとった反射率の差が、各波長における吸収係数である。ここで、 $1\mu\text{m}$ バンドにおける吸収係数の最大値（反射率の最小値）を Band I center と定義する。また Table 5-3-2 における λ_1 から λ_2 までの吸収係数の積分値 (Band I Area) と λ_2 から λ_3 までの吸収係数の積分値 (Band II Area) の比を BAR (Band Area Ratio) と定義する。Band I center および BAR はカンラン石・輝石の存在比と関係することが分かっている(Cloutis *et al.*, 1986)が、Band I center は輝石における Ca の含有量とも関係していることが分かっている(Adams, 1974)。また Gaffey *et al.* (1993a)では、Band I center および BAR の値を用いて S 型小惑星を 7 つのサブクラスに分類することを提唱している。

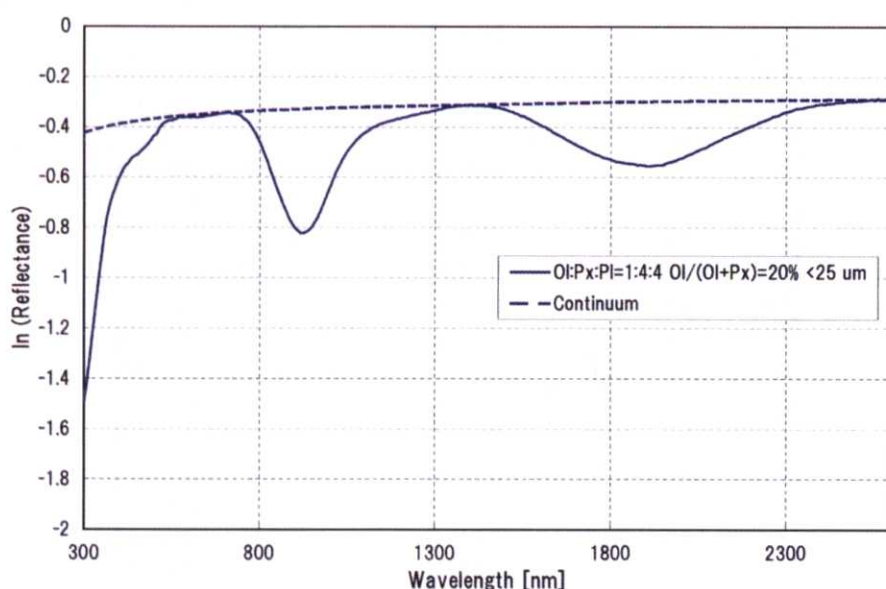


Figure 5-3-7 : Natural log reflectance spectra (solid line) of olivine-pyroxene-plagioclase mixture (Particle size $< 25\mu\text{m}$) and its continuum(broken curve).

自然対数表示した反射スペクトル（実線）とコンティニューム（破線）。データはカンラン石・輝石・斜長石混合物（粒子サイズ $<25\mu\text{m}$ ）。

Table 5-3-2 : Wavelength of contact point between continuum and reflectance spectra.

コンティニュームと反射スペクトルの接点の波長

Sample	Particle size (μ m)	λ 1 (nm)	λ 2 (nm)	λ 3 (nm)
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 20	0-25	715	1395	2600
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 50	0-25	680	1500	2600
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 71	0-25	680	1555	2360
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 80	0-25	575	1570	2600
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 20	45-75	715	1390	2600
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 50	45-75	705	1485	2600
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 71	45-75	675	1575	2360
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 75	45-75	680	1570	2600
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 80	45-75	675	1580	2420
Athens(LL6)	0-125	680	1560	2495
Athens(LL6)	125-250	680	1560	2495
Cherokee Springs(LL6)	0-125	695	1550	2485
Cherokee Springs(LL6)	125-250	710	1555	2485
Alta'ameem(LL5)	0-125	680	1565	2480
Alta'ameem(LL5)	125-250	680	1575	2490
Chateau Renard(L6)	0-125	730	1580	2480
Chateau Renard(L6)	125-250	680	1540	2480
Harleton(L6)	0-125	705	1525	2500
Harleton(L6)	125-250	715	1540	2490
Cynthiana(L4)	0-125	730	1545	2490
Cynthiana(L4)	125-250	740	1525	2500
Dwaleni(H6)	25-250	715	1495	2500
Portales Valley(H6)	20-250	680	1470	2500
Magombedze(H5)	0-150	720	1480	2550
Ucera(H5)	20-250	710	1475	2500
Kabo(H4)	0-150	720	1490	2500
Ourique(H4)	0-150	720	1500	2500
Lodran(Lod)	0-125	700	1460	2500
Acapulco(Aca)	0-125	720	1460	2550
ALHA81261(Aca)	0-125	730	1480	2550
EET99402(Bra)	0-125	660	1770	2480
Reid013(Bra)	0-45	725	1720	2480
Hughes026(Bra)	0-45	725	1705	2490
Brachina(Bra)	0-45	715	1740	2500

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

本研究では、Band I center や BAR に変わり、1 μm バンドにおける吸収係数の強度比を用いて鉱物組成の議論を行う。Band I center の値は、反射スペクトルの S/N が悪い場合には、何かしらの多項式でフィッティングして吸収係数の最大値を求める必要があるが、1 μm バンドは複合吸収帯であり、MGM 法などを用いてフィッティングしなければならない。また吸収バンドが中央付近で平らな場合、Band I center が決めにくいという欠点がある。そこで、Band I center をはさむ 2 波長の吸収係数の比を用いることで、これらの問題を解決する。具体的には 950 nm と 1050 nm の比をとることとする。Table 5-3-1 に示したサンプルについて、Band I center と吸収係数の比の関係を Figure 5-3-8 に示す。

Figure 5-3-8 を見ると、Band I center と吸収係数の強度比には正の相関があることがわかる。

次に BAR についてであるが、BAR は 1 μm バンドと 2 μm バンドの面積を求める必要があるが、Table 5-3-2 に示したように $\lambda_1 \sim \lambda_3$ までの広い波長範囲のスペクトルデータが必要である。カンラン石・輝石の存在比を求めるためだけであれば、1 μm バンド内にあるカンラン石と輝石の吸収バンドを分離して求めることが出来ればよい。輝石の 1 μm 付近の吸収バンドの位置は 1050 nm より短波長側にある(Adams, 1974)ので、1050 nm より長波長側でカンラン石の吸収バンドの現れる波長と 1050 nm より短波長における吸収係数の比をとることで、カンラン石と輝石の強度比を推定することができると考える。具体的には 950 nm と 1250 nm の比をとることとする。Table 5-3-1 に示したサンプルについて、BAR と吸収係数の比の関係を Figure 5-3-9 に示す。

Figure 5-3-9 を見ると、BAR と吸収係数の強度比には負の相関があることがわかる。

Figure 5-3-8、Figure 5-3-9 で用いた波長以外での Band I center や BAR との相関についても調べるために、Band I center については 900 nm、BAR については 1300 nm の吸収係数の強度を用いた場合の結果について Figure 5-3-10 と Figure 5-3-11 に示す。この結果を見ると、950 nm の代わりに 900 nm の値を、1250 nm の代わりに 1300 nm の値を用いても Band I center や BAR との相関には大きな変化はなく、傾向は同じであることがわかる。ただし、Table 5-3-2 における λ_1 や λ_2 の波長に近くなると、吸収バンドの肩の波長の決定誤差の影響が大きくなる可能性があるため、吸収バンドの肩の波長から比較的離れた 950 nm と 1250 nm を用いることにする。Table 5-3-1 に示したサンプルにおける Band I center、BAR、吸収係数の強度比について Table 5-3-3 にまとめる。

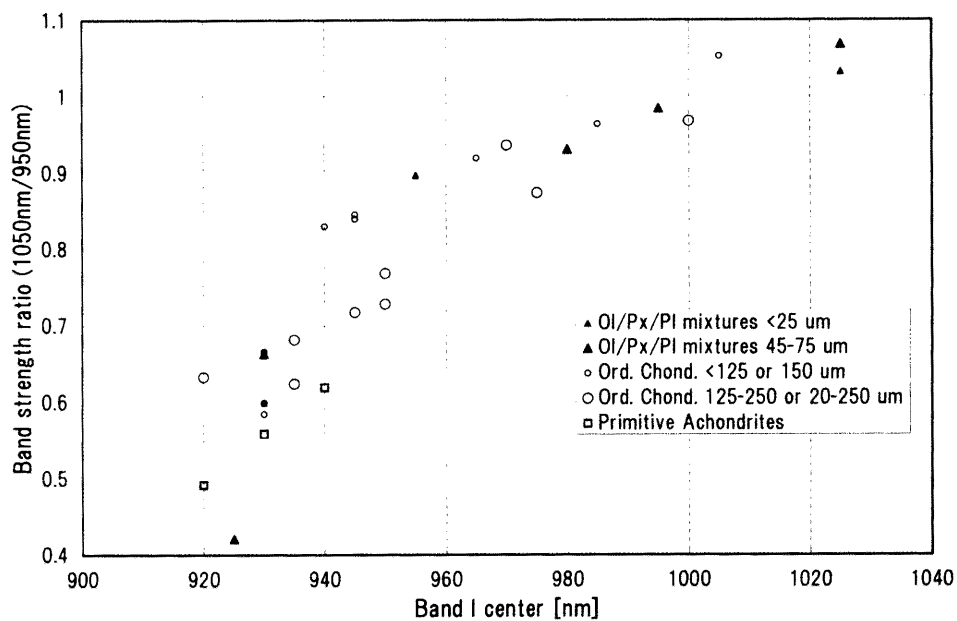


Figure 5-3-8 : Relationship between Band I center and Band strength ratio for various sample.

Band I center と吸収係数の強度比(1050 nm / 950 nm)の関係

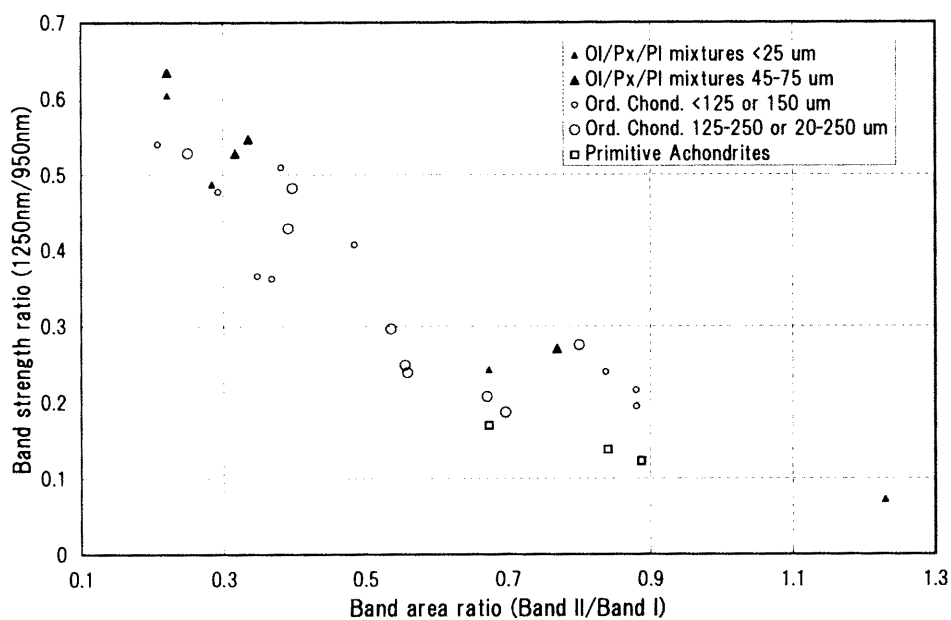


Figure 5-3-9 : Relationship between BAR and Band strength ratio for various sample.

BAR と吸収係数の強度比(1250 nm / 950 nm)の関係

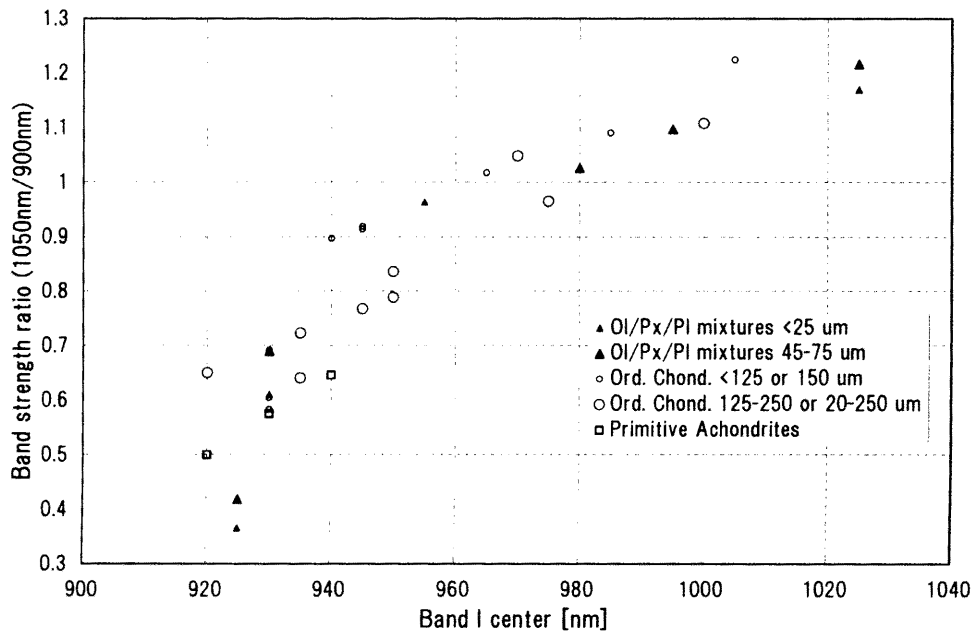


Figure 5-3-10 : Relationship between Band I center and Band strength ratio for various sample.

Band I center と吸収係数の強度比(1050 nm / 900 nm)の関係

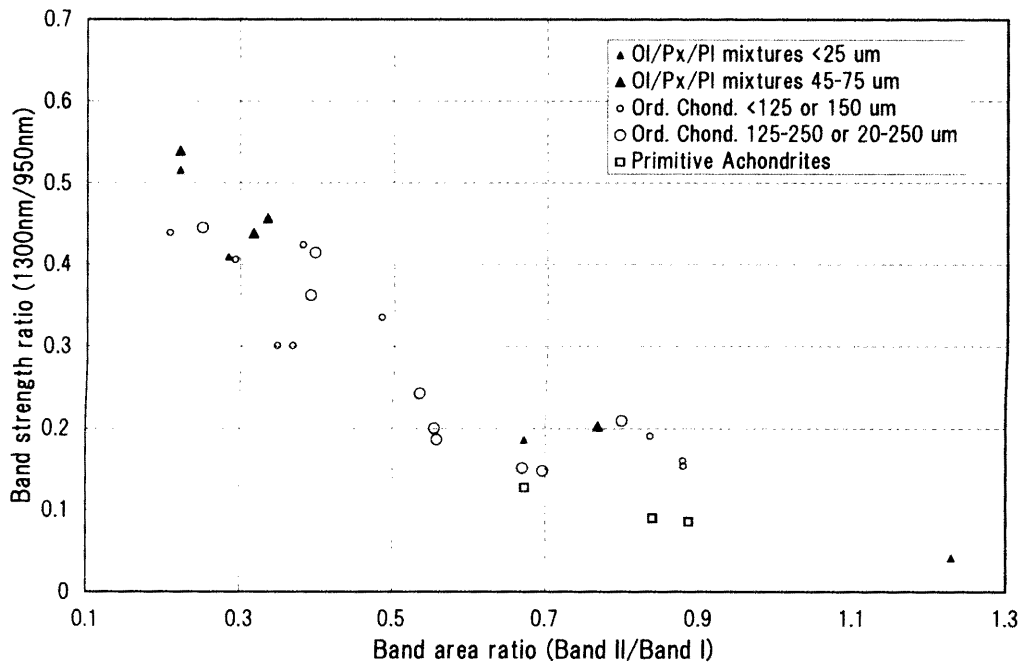


Figure 5-3-11 : Relationship between BAR and Band strength ratio for various sample.

BAR と吸収係数の強度比(1300 nm / 950 nm)の関係

Table 5-3-3 : Spectral parameter of various sample.
 さまざまなサンプルの反射スペクトルの特徴パラメータ

Sample	Particle size (μm)	BAR	Band I Center (μm)	InR-C (1050)/(900)	InR-C (1050)/(950)	InR-C (1250)/(950)	InR-C (1300)/(950)
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 20	0-25	1.23	925	0.37	0.37	0.07	0.04
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 50	0-25	0.67	930	0.61	0.60	0.24	0.19
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 71	0-25	0.28	955	0.96	0.90	0.49	0.41
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 80	0-25	0.22	1025	1.17	1.03	0.60	0.52
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 20	45-75	1.46	925	0.42	0.42	0.08	0.04
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 50	45-75	0.77	930	0.69	0.66	0.27	0.20
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 71	45-75	0.32	980	1.03	0.93	0.53	0.44
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 75	45-75	0.34	995	1.10	0.98	0.55	0.46
Pyroxene-Olivine-Plagioclase mixture 80	45-75	0.22	1025	1.22	1.07	0.63	0.54
Athens(LL6)	0-125	0.21	1005	1.22	1.05	0.54	0.44
Athens(LL6)	125-250	0.25	1000	1.11	0.97	0.53	0.44
Cherokee Springs(LL6)	0-125	0.29	965	1.02	0.92	0.48	0.41
Cherokee Springs(LL6)	125-250	0.39	975	0.97	0.87	0.43	0.36
Alta'ameem(LL5)	0-125	0.38	985	1.09	0.96	0.51	0.42
Alta'ameem(LL5)	125-250	0.40	970	1.05	0.94	0.48	0.41
Chateau Renard(L6)	0-125	0.37	945	0.91	0.84	0.36	0.30
Chateau Renard(L6)	125-250	0.56	945	0.77	0.72	0.25	0.20
Harleton(L6)	0-125	0.35	945	0.92	0.85	0.37	0.30
Harleton(L6)	125-250	0.54	950	0.84	0.77	0.30	0.24
Cynthiana(L4)	0-125	0.48	940	0.90	0.83	0.41	0.34
Cynthiana(L4)	125-250	0.80	935	0.72	0.68	0.28	0.21
Dwaleni(H6)	25-250	0.67	935	0.64	0.62	0.21	0.15
Portales(H6)	20-250	0.56	950	0.79	0.73	0.24	0.19
Magomedze(H5)	0-150	0.88	930	0.60	0.60	0.22	0.16
Ucera(H5)	20-250	0.70	920	0.65	0.63	0.19	0.15
Kabo(H4)	0-150	0.88	930	0.58	0.58	0.19	0.15
Ourique(H4)	0-150	0.84	930	0.69	0.67	0.24	0.19
Lodran(Lod)	0-125	0.89	920	0.50	0.49	0.12	0.09
Acapulco(Aca)	0-125	0.84	930	0.58	0.56	0.14	0.09
ALHA81261(Aca)	0-125	0.67	940	0.65	0.62	0.17	0.13
EET99402(Bra)	0-125	0.01	1070	1.75	1.43	1.08	0.99
Reid013(Bra)	0-45	0.08	1075	2.04	1.60	1.01	0.96
Hughes026(Bra)	0-45	0.03	1065	1.81	1.47	0.90	0.82
Brachina(Bra)	0-45	-0.01	1055	1.73	1.42	0.83	0.74

5-3-5 吸収係数強度比プロット

Figure 5-3-12 に 950 nm、1050 nm、1250 nm の吸収係数の強度比を各サンプルについてプロットした図を示す。この図によって、スペクトルの 1 μm バンドの解析のみで、カンラン石・輝石の存在比の議論ができることがわかる。図の右上に行くほどカンラン石に富む物質であることになる。また、普通コンドライトの H,L,LL などの隕石タイプの区別もある程度できることがわかる。これは、隕石タイプの違いによって、カンラン石・輝石存在比が異なっているためである。Table 5-3-1、Table 5-3-3、Figure 5-3-12 を見ながら、具体的に OI/(OI+Px)比の分かっている隕石について比較してみると、Cherokee springs (68%)、Alta'ameem (70%)は、鉱物混合物の 71%の近くにプロットされており、Dwaleni (53%)、

Magombedze (56%)、Ucera (54%)、Kabo (51%)、Acapulco (52%)は、鉍物混合物の 50% の近くにプロットされていて、隕石サンプルにおけるカンラン石存在度の傾向と鉍物混合物におけるカンラン石存在度の傾向は一致していると考えられる。

次に、このプロットにおけるその他の鉍物組成の影響について議論する。横軸の 950 nm と 1050 nm の級数係数の強度比が Band I center と相関があることは前節でも述べたが、Band I center は輝石に含まれる Ca の量によってシフトすることが分かっており (Cloutis *et al.*, 1986)、Ca の量が増えるほどこの図でのプロットは右側にシフトすることになる。

カンラン石の組成については、カンラン石が 1 μ m 帯にもつ 3 つの吸収バンド(Burns, 1970)について、Mg/Fe 比(Fo 値)が高くなるほど、M2 サイトの吸収バンドの強度(1050 nm 付近の吸収バンドの強度)が強くなる傾向があり(Sunshine and Pieters, 1998)、この図では右にシフトする可能性がある。

また長石の吸収バンドは 1250 nm 付近にあるため、長石を豊富に含む岩石サンプルでは、この図で上にシフトする可能性がある。

次に粒子サイズの影響を考える。Cherokee Springs のデータは粒子サイズが細かいと、横軸、縦軸ともに、0.05 ずつ増えている (右上にシフトしている)。他の隕石サンプルのデータでも、粒子サイズが細かいほど Figure 5-3-12 では右上にシフトする傾向がある。しかし、カンラン石・輝石・長石混合物のデータ点では、粒子サイズが細かいデータは左下にシフトする傾向があり、必ずしも一定方向ではないことがわかる。このように粒子サイズの影響はあるものの、シフトの量はそれほど大きくなく、5~10%程度の精度でカンラン石/輝石の存在比を推定できると考える。

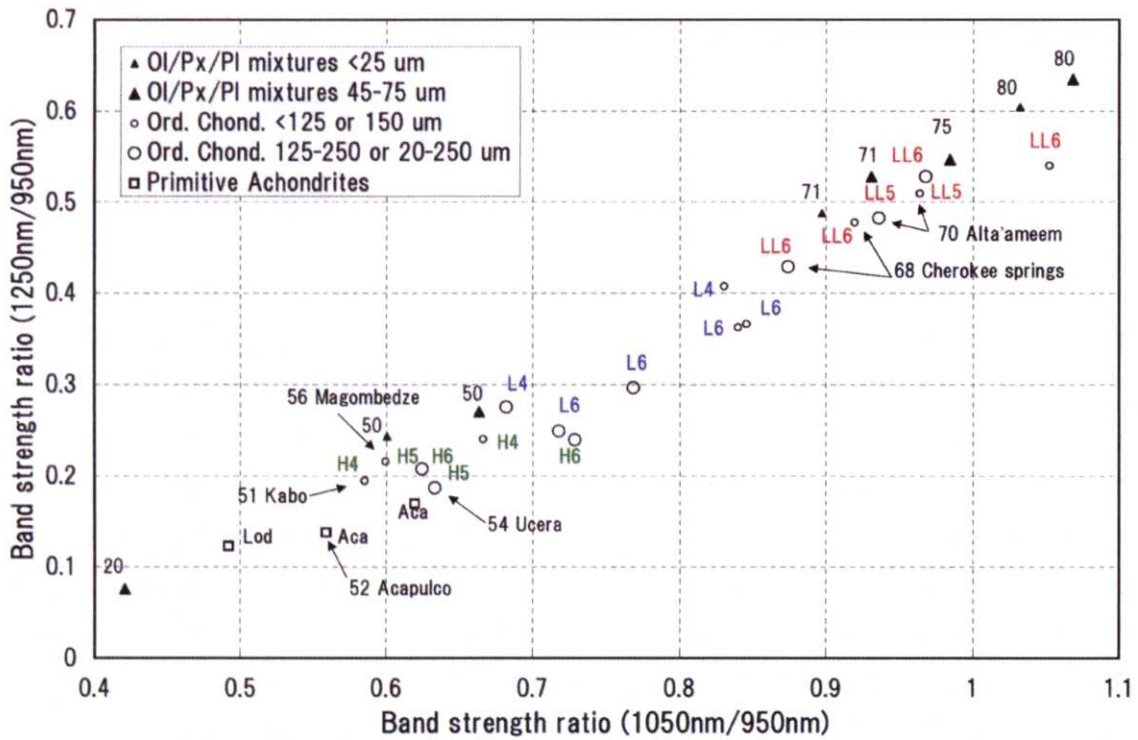


Figure 5-3-12 : Band strength ratio plot for various sample (Olivine – Pyroxene – Plagioclase mixture (triangle), Ordinary chondrite (circle), and Primitive achondrite (square)). Number indicates olivine abundance (Ol/(Px+Ol) in %). H6, L6, LL6 are chemical and petrographic type of ordinary chondrite. Aca indicates Acapulcoite and Lod indicates Lodranite. Data from RELAB Public Spectroscopy Database [6]. Data files are shown in Table 5-3-1.

さまざまなサンプルの吸収係数の強度比のプロット。カンラン石・輝石・長石混合物は▲、普通コンドライトは○、始原的エイコンドライトは□。数字はカンラン石存在度 (Ol/(Px+Ol) %)。H6,L6,LL6 は隕石の化学・岩石学的分類。Aca はアカプルコアイト、Lod はロドラナイト。スペクトルデータは RELAB Public Spectroscopy Database [6] より。用いたデータの詳細は Table 5-3-1 参照。

5-4 イトカワの表面鉱物種推定

5-4-1 NIRS の観測波長域による制約の影響

次に実際に NIRS で取得したイトカワの平均スペクトルについて解析を行う。

前節で行った反射スペクトルの解析と同様に、イトカワのスペクトルからコンティニューム成分を取り除く。コンティニュームを取り除くことにより、太陽位相角に伴うスペクトルの傾きの変化の影響や、鉄粒子などの不透明鉱物の混合によるスペクトルの傾きの変化を取り除き、主要ケイ酸塩鉱物の特徴を捉えやすくなることができる。

イトカワの平均スペクトルのコンティニュームの決め方についても *Sunshine et al.* (1990)などで行われている手法にならって、反射率の対数を取り、吸収バンドの肩に接する強度が波長の逆数に比例する曲線とする方法を採用する。ただし NIRS の観測波長域は完全には、1 μ m 帯も 2 μ m 帯も両端の肩を含んではいない。1 μ m 帯については、地上観測で得られているスペクトルを見ると 1 μ m 帯の短波長側の肩は 750 nm 付近にあり、NIRS の最短観測波長の 764 nm とそれほど変わらないので、この波長が肩であると仮定する。1 μ m 帯の長波長側の肩と 2 μ m 帯の短波長側の肩は、地上観測のスペクトルを参考にして 1565 nm のデータ点とした。短波長側の肩を NIRS の最短観測波長にすることによる影響を見積もるために、短波長側の肩の位置を 764 nm とせず、750 nm まで外挿した点を肩として解析を行ったところ、吸収係数強度比の値は 5%ほど小さくなり、Figure 5-3-12 のプロット位置では左下に少しシフトするようである。つまり、コンティニュームの決め方による不確かさは 5%程度であると考えられる。

5-4-2 イトカワのカンラン石・輝石存在比

Figure 5-4-1 にイトカワの平均スペクトルから求めた吸収係数強度比をプロットした。イトカワの平均スペクトルは Figure 5-1-3 にも示した、9 月 21 日と 10 月 8 日に実施した赤道スキャンによるものを用いた。

Figure 5-4-1 には Figure 5-3-12 に示した鉱物混合物や隕石のスペクトルデータもプロットしてある。これらのデータと比較すると、コンティニュームの決め方による不確かさや、粒子サイズや他の組成の影響もあるが、イトカワの表面物質のカンラン石 / (カンラン石 + 輝石) 比の値は 70~80% であると考えられる。

比較のために、小惑星エロスのスペクトル (*Rivkin et al.*, 2004) から求められた吸収係数強度比も同じ図に示した。ニア・シューメーカー探査機の NIS の観測から得られているエロスの表面物質のカンラン石 / (カンラン石 + 輝石) 比の値は 50~80% と推定されており、(*Clark et al.*, 2001; *McFadden et al.*, 2001; *Izenberg et al.*, 2003)、イトカワの表面物質の方がエロスよりカンラン石の含有量が多いようである。

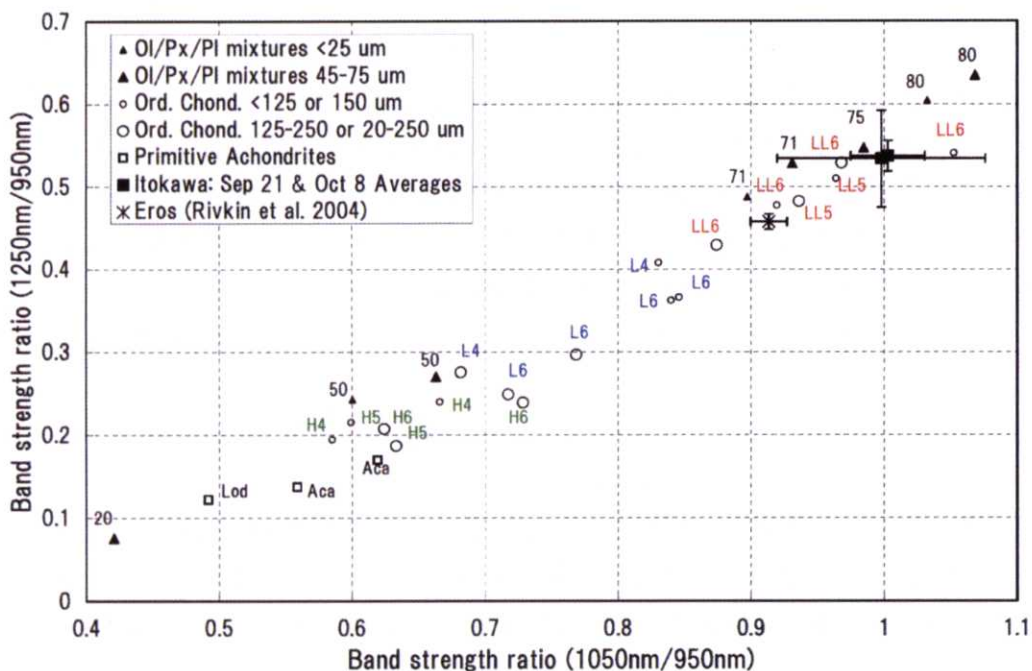


Figure 5-4-1 : Natural log absorption strength at 1050 and 1250 nm relative to that 950 nm of average Itokawa spectra acquired by NIRS on September 21 and October 8 in comparison with Eros (Rivkin *et al.*, 2004), powder samples of ordinary chondrites, primitive achondrites [Acapulcoites (Acap) and Lodranites (Lod)], and orthopyroxene-olivine-plagioclase mixtures (Pieters and Hiroi, 2004).

1 μ m 吸収帯の吸収係数の比。950 nm に対する 1050 nm および 1250 nm の吸収係数を NIRS で得られたイトカワの平均スペクトルについてプロット。エロス(Rivkin *et al.*, 2004)、普通コンドライト、始原的エイコンドライト(アカプルコアイトは[Aca]、ロドラナイトは[Lod]と表記)、輝石・カンラン石・長石混合物(Pieters and Hiroi, 2004)の粉末サンプルについてもあわせてプロットしてある。

5-4-3 イトカワの対応隕石タイプ

イトカワの表面物質に対応する隕石タイプについて議論する。Figure 5-4-1 では、イトカワの平均スペクトルのデータ点は、普通コンドライト隕石の中では、LL5-6 コンドライトの領域と重なっている。

LL コンドライトの中の岩石タイプについては、吸収係数の強度比が主にカンラン石 / 輝石存在比の違いを表しているため、平均的な鉱物組成比が同じである 4-6 を区別するのは難しい。Gaffey *et al.* (1993)によると、岩石タイプの違いによって、反射率の絶対値や、吸収バンドの深さに違いが現れている可能性が示唆されている。これは熱変成度の違いによって、隕石中のマトリックスの状態や結晶サイズが変化していることと関係しているのでは

ないかと考えられる。

また S 型小惑星との関係が普通コンドライト以外で指摘されている、始原的エイコンドライトについても、プロットしたが、ロドラナイトやアカプルコアイトはカンラン石 / 輝石比がイトカワの表面物質に比べると低く、対応する隕石ではなさそうである。ブラッチナイトはカンラン石に富むエイコンドライトであるが、輝石はほとんどなく、この図では右上の図の表示範囲外にプロットされてしまうため、イトカワの表面物質に対応する隕石ではないと考えられる。したがって、吸収係数強度比で見る限り、イトカワの表面物質に対応する既存の隕石は LL タイプの普通コンドライトであるという結論になる。

5-4-4 Alta'ameem 隕石との比較

次に、イトカワの表面物質が LL タイプの普通コンドライトと類似していると考えた場合、両者の反射スペクトルが全体としてどの程度一致しているのかを考えることにする。

Figure 5-4-1 にはイトカワの平均スペクトルのプロット位置に一致する隕石のデータはない。しかし、NIRS データのスペクトル解析において $1\mu\text{m}$ バンドの短波長側の肩が実際には 764 nm より短波長側にあることを考えると、実際のイトカワのプロット位置は少し左下になるはずである。そこで、イトカワのデータ点の左下にある Alta'ameem (LL5) 隕石と比較するのが良いと考える。

そこで、Alta'ameem 隕石のスペクトルデータを NIRS と同じ観測波長の反射スペクトルになるように補間し、コンティニュームの決め方も NIRS によるイトカワのスペクトルデータと同じにして解析を行った。

$2\mu\text{m}$ 帯の長波長側の肩については、完全に NIRS の観測波長域の外側なため、コンティニュームの強度は波長に依らず一定と仮定した。

Figure 5-4-2 にイトカワの平均スペクトルと Alta'ameem 隕石のスペクトルを示す。

次にそれぞれのデータについて自然対数を取り、それぞれのコンティニュームとあわせて表示したのが Figure 5-4-3 である。

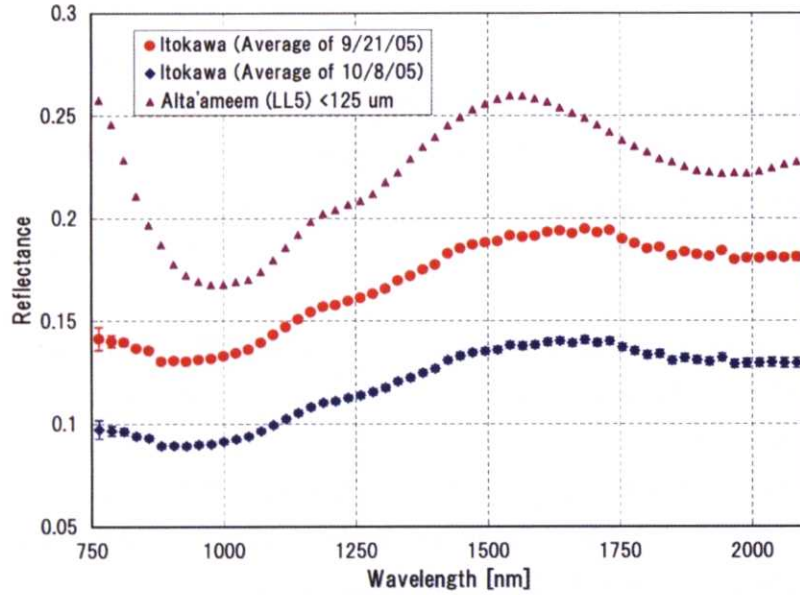


Figure 5-4-2 : Average reflectance spectra of Itokawa on September 21 (red) and October 8 (blue). Also plotted spectrum of an Alta'ameem LL5 chondrite sample (purple).
 イトカワの平均スペクトル（9月21日(赤)と10月8日(青)の赤道スキャンによるもの）と Alta'ameem (LL5)隕石の反射スペクトル。

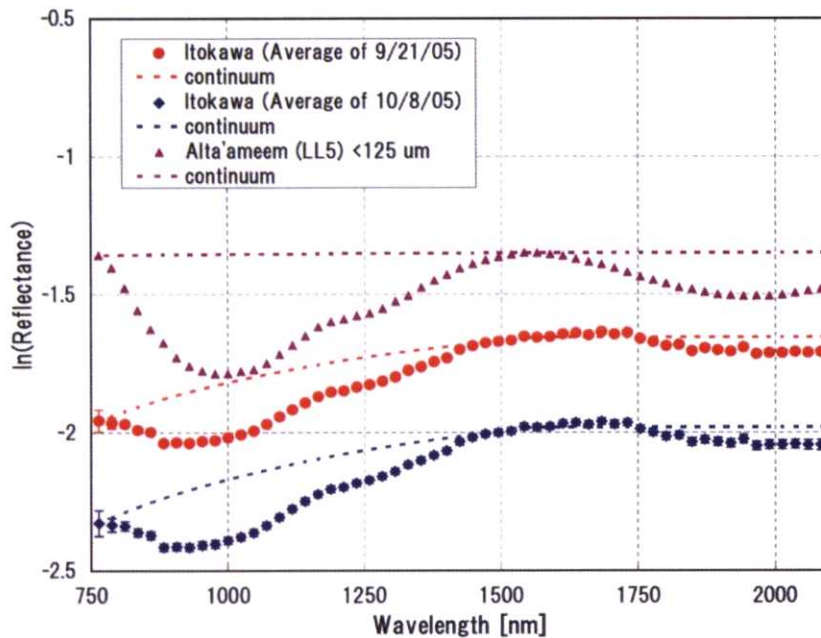


Figure 5-4-3 : Natural log reflectance spectra shown in Figure 5-4-2. Also plotted their continuum.
 自然対数表示の反射スペクトル。データは Figure 5-4-2 と同じ。それぞれのスペクトルのコンティニュームもあわせて表示した。

さらに Figure 5-4-3 において、反射スペクトルとコンティニュームの差をプロットしたのが Figure 5-4-4 である。

コンティニュームを除去すると、太陽位相角に伴うスペクトルの傾きの違いもなくなり、2つのイトカワの平均スペクトルが誤差範囲で一致することがわかる。

一方、Alta'ameem 隕石 (LL5) の粉体 (粒子サイズ 125 μm 以下) の反射スペクトルと比較すると 1 μm バンドの形は相似形でよくあっているが、吸収の深さは異なっていることがわかる。

そこで、Alta'ameem 隕石の反射スペクトルの縦軸を 0.49 倍にスケールしたのもあわせてプロットすると、イトカワの平均スペクトルは、Alta'ameem 隕石のスペクトルはかなりよく一致していることがわかる。このことは、イトカワの表面物質が、Alta'ameem 隕石の鉱物組成と一致しているため、1 μm 帯に見られる、ケイ酸塩鉱物の吸収バンドの強度比が Alta'ameem 隕石と同じように表れているためであると考えられる。

イトカワの反射スペクトルと Alta'ameem 隕石の反射スペクトルの縦軸のスケールが違う理由は、粒子サイズが違う (イトカワの方が小さい) か、不透明鉱物の含有量が異なっている平均的な粒子の透過率が違う (イトカワの方が透過率が低い) ため、あるいは、これらの両方が組み合わさっているため、と考えられる。実際、地上観測のイトカワのスペクトルは普通コンドライトの反射スペクトルに比べてスペクトルの傾きが右上がりになっており、Binzel *et al.* (2001) では、宇宙風化による微小金属鉄粒子の増加によるものであるとしており、その考えを用いると、平均的な粒子の透過率が普通コンドライトに比べて低いと解釈でき、データの傾向と一致する。

なお、Figure 5-4-4 ではイトカワの平均スペクトルとスケールした Alta'ameem 隕石のスペクトルについて 1450 nm 付近と 1700 nm 付近で違いがあるが、これは 5-2 章でも述べたように、地上校正データの不確かさによるノイズが原因であると考えられる。

以上の議論から、イトカワの平均スペクトルは吸収係数強度比だけでなく、スケールの違いはあるものの、スペクトル全体の形として普通コンドライト隕石の中の Alta'ameem (LL5) 隕石と良く一致することが分かった。

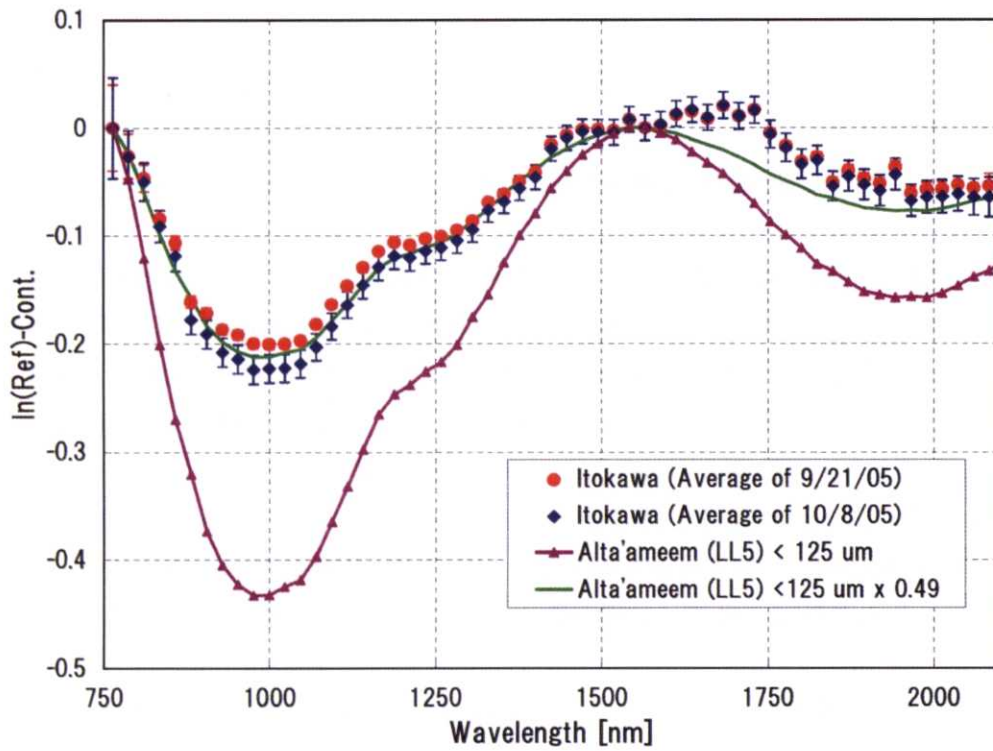


Figure 5-4-4 : Natural log average reflectance spectra of Itokawa observed by NIRS on September 21 (red) and October 8 (blue). Background continua are subtracted. Also plotted continuum-removed of an Alta'ameem LL5 chondrite sample(purple) and scaled one(green).

対数スケールであらわしたイトカワの反射スペクトル(9月21日(赤)、10月8日(青))。コンティニューム成分は取り除いてある。実線は LL5 普通コンドライト(Alta'meem)粉末の反射スペクトル(紫)とその縦軸のスケールを 0.49 倍したもの(緑)。

5-5 イトカワの反射スペクトルの場所による違い

5-5-1 3つの代表的な場所のスペクトルの特徴

次に NIRS の観測から得られた、イトカワ表面の場所による反射スペクトルの違いについて議論する。

イトカワの表面は、ボルダーと呼ばれる岩塊の多い領域(Boulder area)と、Muses Sea という領域に代表されるスムーズな領域(Smooth area)に 2 分されることが分かっている(Saito *et al.*, 2006)。また、ボルダーの多い領域の中には、反射率の高い領域が点在しており、Brighter area (High-albedo area とか White region と呼ばれる) と呼ばれている(Saito *et al.*, 2006)。これらの領域の成因については、まだ議論の最中であるが、スムーズな領域は、衝突などによって励起されたイトカワの全球的な振動により、細かい粒子が重力ポテンシャルの低い領域に集中してできたものと考えられており、Brighter area は、そのような振動によって、表層の物質が移動した際に露呈した地下物質であると考えられている。

そこで、AMICA との同時観測で NIRS のフットプリントが比較的良く分かっており、かつ同じ日に取得して、太陽位相角の違いがほとんどないデータについて、上記の 3 点の観測ができた例として、10月26日の観測で得られたスペクトルを Figure 5-5-1 に示す(Abe *et al.*, 2006a)。Boulder area としては、Tsukuba region (Figure 5-5-2 参照)、Brighter area としては、Little Woomera のリム領域 (Figure 5-5-3 参照)、スムーズ領域としては、Muses Sea (Figure 5-5-4 参照) の反射スペクトルである。どれも、太陽位相角は約 20 度で、イトカワ表面からの距離は 5 km 程度と同一条件で取得されている。

3つの領域のスペクトルの特徴としては、Boulder area の反射率は他の領域に比べて低い。また、Brighter area(High-albedo area)の 1 μ m 吸収帯の深さは他の領域に比べて深く、Muses Sea は逆に浅い。

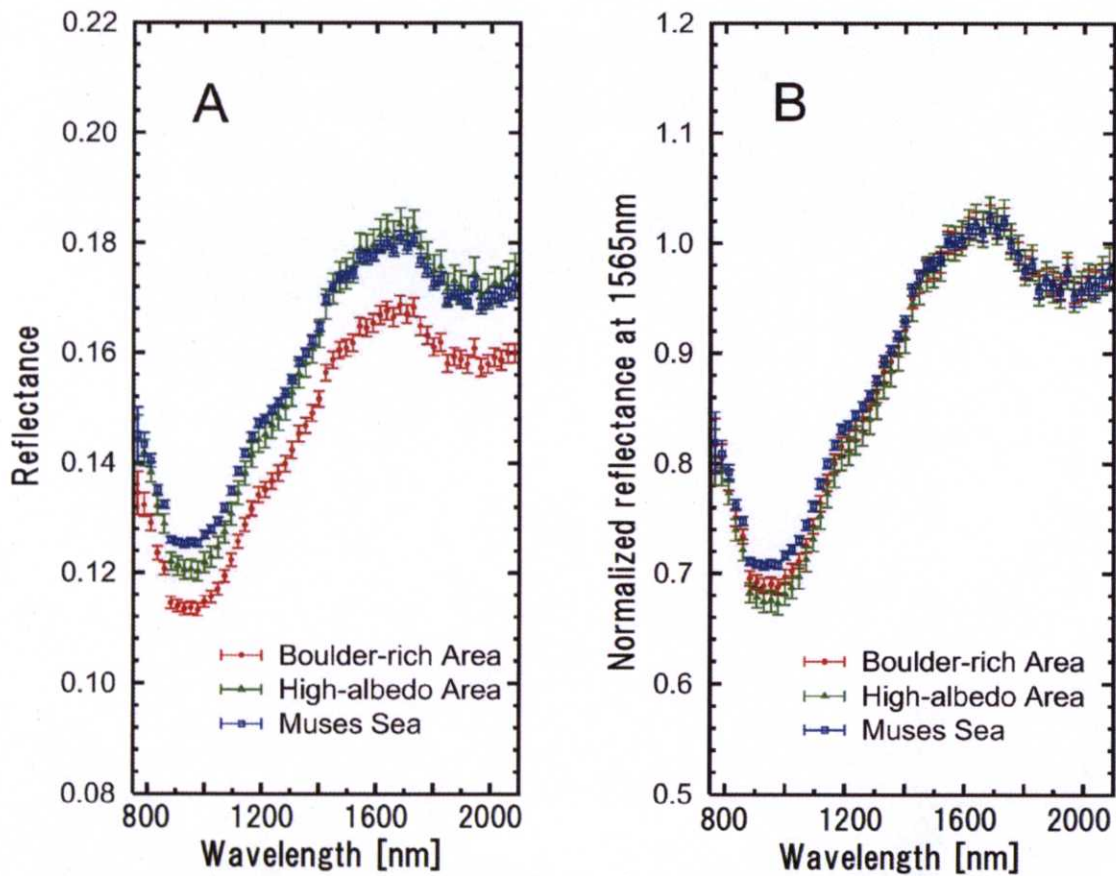


Figure 5-5-1 : (A) Reflectance spectra of three typical areas on Itokawa. A boulder rich area (red), high-albedo area (green), and Muses Sea (blue) are plotted.(B) Replotted spectra are normalized at 1565 nm.

3つの代表的な領域のスペクトル。Boulder-rich Area(red) は 2492209964。High-albedo area (green)は 2492498099。Muses Sea(blue) は 2493016422 のデータをプロット。左側は反射率の絶対値、右側は 1565 nm で規格化してある。



Figure 5-5-2: Footprint for observing the boulder-rich area (Figure 5-5-1) is denoted by a small red square. Blue square is footprints for observing its neighborhood (Figure 5-5-5). An arrow is the move direction of the NIRS footprint. Image data is obtained by AMICA (ST_249225173).

10月26日に観測した Boulder area の NIRS フットプリント。Tsukuba region。赤い枠が AMICA 撮影時の NIRS のフットプリント、青い枠は Figure 5-5-5 に示したスペクトルデータ取得時のフットプリント。矢印は NIRS フットプリントの移動方向。AMICA 撮影データは ST_249225173。



Figure 5-5-3 : Footprint for observing the brighter area (Figure 5-5-1) is denoted by a small red square. Blue square is footprints for observing its neighborhood (Figure 5-5-6). An arrow is the move direction of the NIRS footprint. Image data is obtained by AMICA (ST_2492513077).

10月26日に観測した Brighter area の NIRS フットプリント。Little Woomera region。赤い枠が AMICA 撮像時の NIRS のフットプリント、青い枠は Figure 5-5-6 に示したスペクトルデータ取得時のフットプリント。矢印は NIRS フットプリントの移動方向。AMICA 撮像データは ST_2492513077。



Figure 5-5-4 : Footprint for observing the smooth area (Figure 5-5-1) is denoted by a small red square. Blue square is footprints for observing its neighborhood (Figure 5-5-7). An arrow is the move direction of the NIRS footprint. Image data is obtained by AMICA (ST_2493031594).

10月26日に観測した Smooth area の NIRS フットプリント。Muses Sea。赤い枠が AMICA 撮像時の NIRS のフットプリント、青い枠は Figure 5-5-7 に示したスペクトルデータ取得時のフットプリント。矢印は NIRS フットプリントの移動方向。AMICA 撮像データは ST_2493031594。

Figure 5-5-1 で見られたスペクトルの特徴が、1 回の測定だけに見られるものなのかを確認するために、連続して観測しているうちの、前後 2 回ずつの測定について、調べたのが Figure 5-5-5~Figure 5-5-7 である。このときのフットプリントは Figure 5-5-2~Figure 5-5-4 に青色の枠で示してある。Brighter area と Muses Sea の前後のスペクトルは、多少ばらつきが見られるが、これは、Brighter area は小惑星表面上にパッチ状に存在しているので、このときのフットプリントサイズでは、フットプリントサイズに含まれる反射率の高い領域の割合によってスペクトルに変化していることと、Muses Sea については、フットプリントが Muses Sea の端の Boulder area にかかっていることが原因であると考えられる。いずれにしても、3 つの領域のスペクトルの特徴は前後のスペクトルでも確認することができ、Boulder area のスペクトル (Figure 5-5-5) は反射率が低く、吸収バンドの深さが Brighter area に比べて浅い。Brighter area のスペクトル (Figure 5-5-6) は反射率が高く、吸収バンドの深さが深い。Smooth area のスペクトル (Figure 5-5-7) は吸収バンドは浅く、反射率は Boulder area より高い、という特徴を持つ。

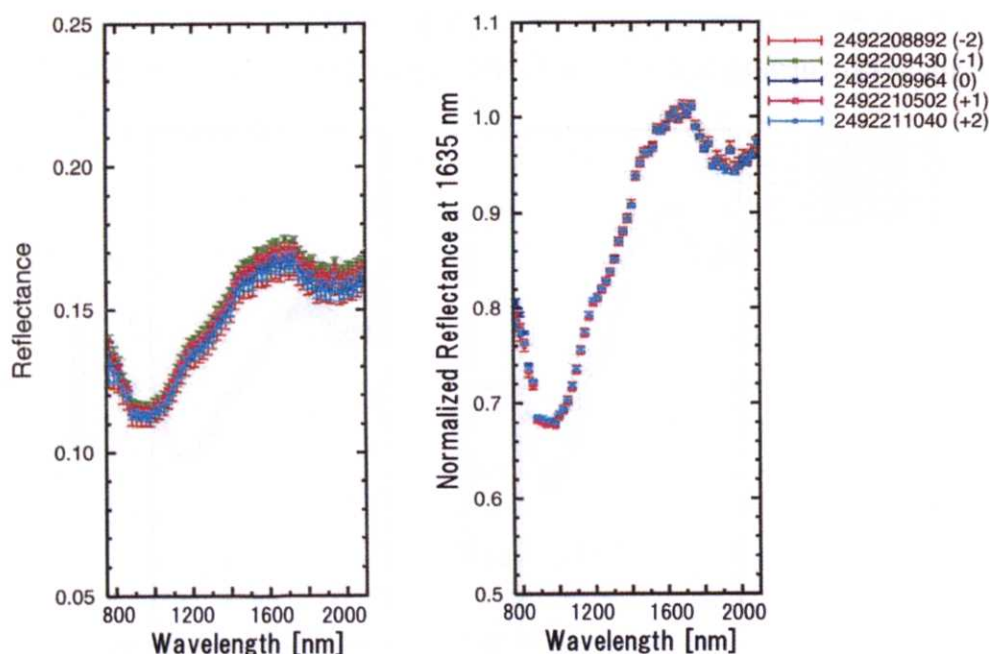


Figure 5-5-5 : (Left) Reflectance spectra of Boulder area observed on October 26. (Right) Replotted spectra are normalized at 1565 nm. Footprints at that time are shown in Figure 5-5-2. Spectral data file of NIRS are 2492208892~2492211040. Boulder area のスペクトル(反射率の絶対値(左)と 1565 nm で規格化したスペクトル(右))。10月26日観測。フットプリントは Figure 5-4-2 参照。データは 2492208892~2492211040。

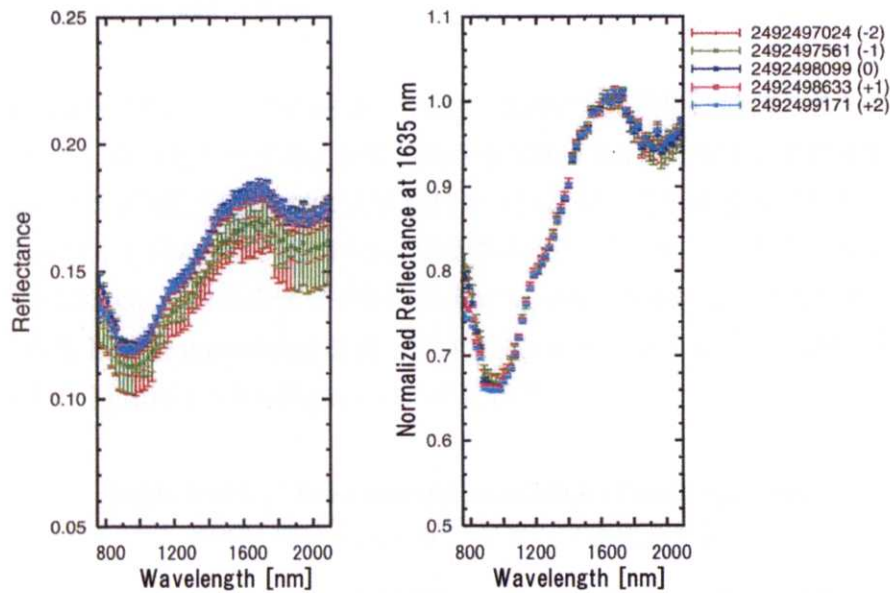


Figure 5-5-6 : (Left) Reflectance spectra of Brighter area observed on October 26. (Right) Replotted spectra are normalized at 1565 nm. Footprints at that time are shown in Figure 5-5-3. Spectral data file of NIRS are 2492497024~2492499171.

Brighter area のスペクトル(反射率の絶対値(左)と 1565 nm で規格化したスペクトル(右))。10月26日観測。フットプリントはFigure 5-5-3 参照。データは2492497024~2492499171。

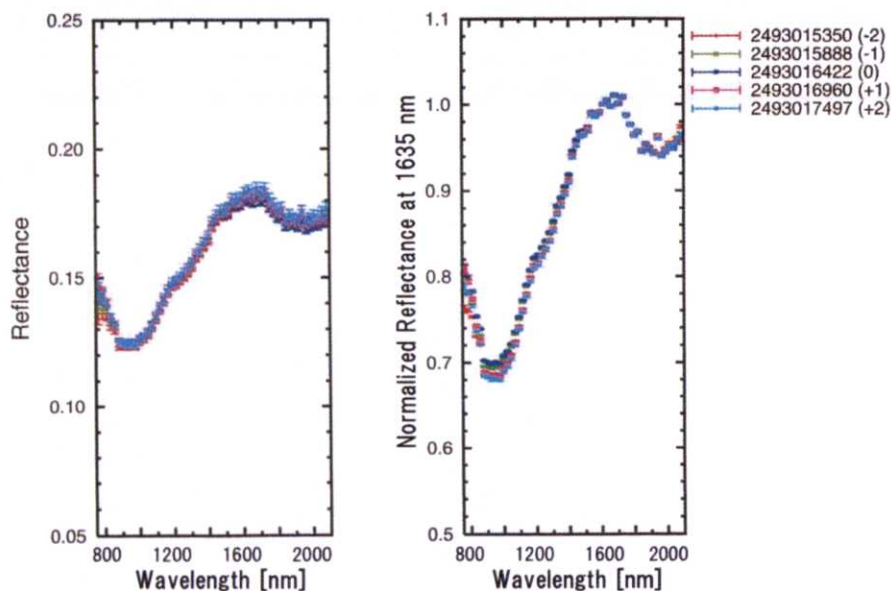


Figure 5-5-7 : (Left) Reflectance spectra of smooth area observed on October 26. (Right) Replotted spectra are normalized at 1565 nm. Footprints at that time are shown in Figure 5-5-4. Spectral data file of NIRS are 2493015350~2493017497.

Smooth area のスペクトル(反射率の絶対値(左)と 1565 nm で規格化したスペクトル(右))。10月26日観測。フットプリントはFigure 5-5-4 参照。データは2493015350~2493017497。

5-5-2 幾何学補正後の比較

10月26日以外にも、3つの領域を同日にかつ AMICA と同時に観測できたデータを選択して議論を行う。用いたデータおよび観測条件を Table 5-5-1 に示す。それぞれの日にちでは太陽位相角はほぼ同じであるが、入射角条件が異なっていることがわかる。また太陽位相角については4日のデータで4~24度程度の範囲で異なっているデータを集めることができたことになる。これらのデータを同じ条件で比較できるようにするために、NIRS の観測で得られた Hapke parameter を用いて4-3章で述べたような方法で幾何学補正を行ったスペクトルを Figure 5-5-8~Figure 5-5-11 に示す。

Table 5-5-1 : Observational condition of each spectra.

解析に用いたスペクトルデータの観測条件

データファイル名	観測日	時刻(UT)	探査機・観測 点距離(km)	太陽・観測点 距離(km)	入射角 (deg)	反射角 (deg)	太陽位相 角(deg)	備考
2492209964	2005 10 26	8:31:04	4.8	149156092	29.4	42.3	24.4	Boulder
2492498099	2005 10 26	11:01:08	4.7	149115176	9.5	27.1	23.2	Brighter
2493016422	2005 10 26	15:31:05	4.7	149041845	25.7	44.8	19.7	Smooth
2494976921	2005 10 27	8:32:13	4.0	148767656	31.2	35.4	9.4	Boulder
2495272537	2005 10 27	11:06:11	4.0	148726756	41.7	44.2	7.7	Brighter
2495791049	2005 10 27	15:36:14	4.1	148655298	32.1	33.6	6.9	Smooth
2498152617	2005 10 28	12:06:11	4.7	148334405	37.0	35.3	3.8	Boulder
2498114230	2005 10 28	11:46:12	4.8	148339561	12.3	13.5	4.0	Brighter
2498632704	2005 10 28	16:16:14	4.9	148270092	38.6	41.6	4.2	Smooth
2506679712	2005 10 31	14:07:17	5.3	147239576	50.9	42.5	14.0	Boulder
2506487616	2005 10 31	12:27:14	6.7	147263114	55.1	54.6	14.4	Brighter
2506909945	2005 10 31	16:07:11	5.0	147211435	3.8	13.8	11.8	Smooth

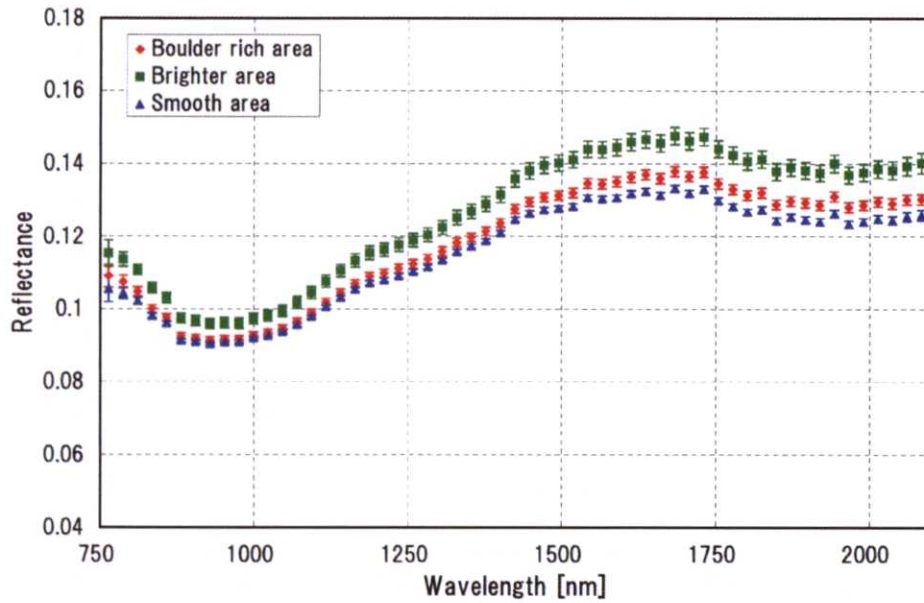


Figure 5-5-8 : Reflectance spectra of boulder area (Boulder-rich area, 2492209964), brighter area (White region, 2492498099), and smooth area (Muses Sea, 2493016422) observed on October 26. Spectra are geometrical corrected using Hapke parameter of NIRS observation. Geometrical condition is $(i, e, a) = (30, 0, 30)$.

10月26日に観測した Boulder area (Boulder-rich area) , Brighter area (White region), Smooth area (Muses Sea)のスペクトル。スペクトルは NIRS の観測で求めた Hapke parameter を用いて $(i, e, a) = (30, 0, 30)$ の条件に補正してある。使用データは 2492209962 (Boulder-rich area)、2492498099 (White region)、2493016422 (Muses Sea)。

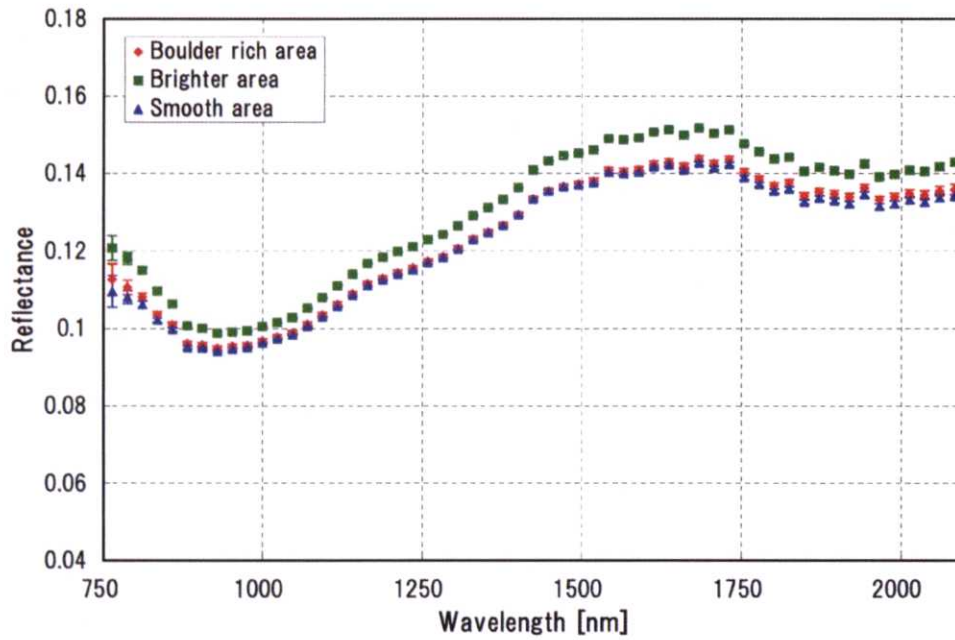


Figure 5-5-9 : Reflectance spectra of boulder area (Boulder-rich area, 2494976921), brighter area (White region, 2495272537), and smooth area (Muses Sea, 2495791049) observed on October 27. Spectra are geometrical corrected using Hapke parameter of NIRS observation. Geometrical condition is $(i, e, a) = (30, 0, 30)$.

10月27日に観測した Boulder area (Boulder-rich area) , Brighter area (White region), Smooth area (Muses Sea)のスペクトル。スペクトルは NIRS の観測で求めた Hapke parameter を用いて $(i, e, a) = (30, 0, 30)$ の条件に補正してある。使用データは 2494976921 (Boulder-rich area)、2495272537 (White region)、2495791049 (Muses Sea)。

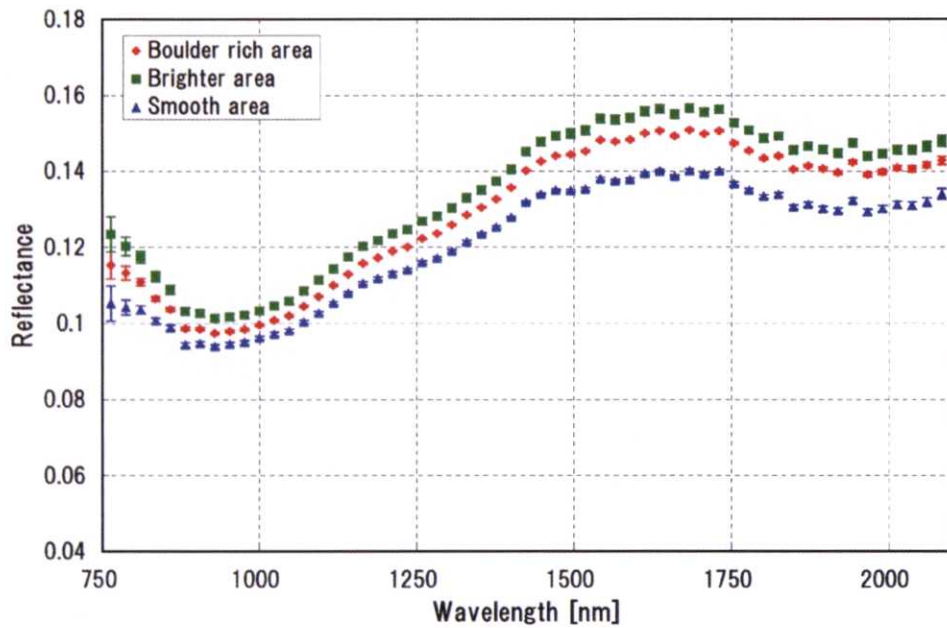


Figure 5-5-10 : Reflectance spectra of boulder area (Boulder-rich area, 2498152617), brighter area (White region, 2498114230), and smooth area (Muses Sea, 2498632704) observed on October 28. Spectra are geometrical corrected using Hapke parameter of NIRS observation. Geometrical condition is $(i, e, a) = (30, 0, 30)$.

10月28日に観測した Boulder area (Boulder-rich area) , Brighter area (White region), Smooth area (Muses Sea)のスペクトル。スペクトルは NIRS の観測で求めた Hapke parameter を用いて $(i, e, a) = (30, 0, 30)$ の条件に補正してある。使用データは 2498152617 (Boulder-rich area)、2498114230 (White region)、2498632704 (Muses Sea)。

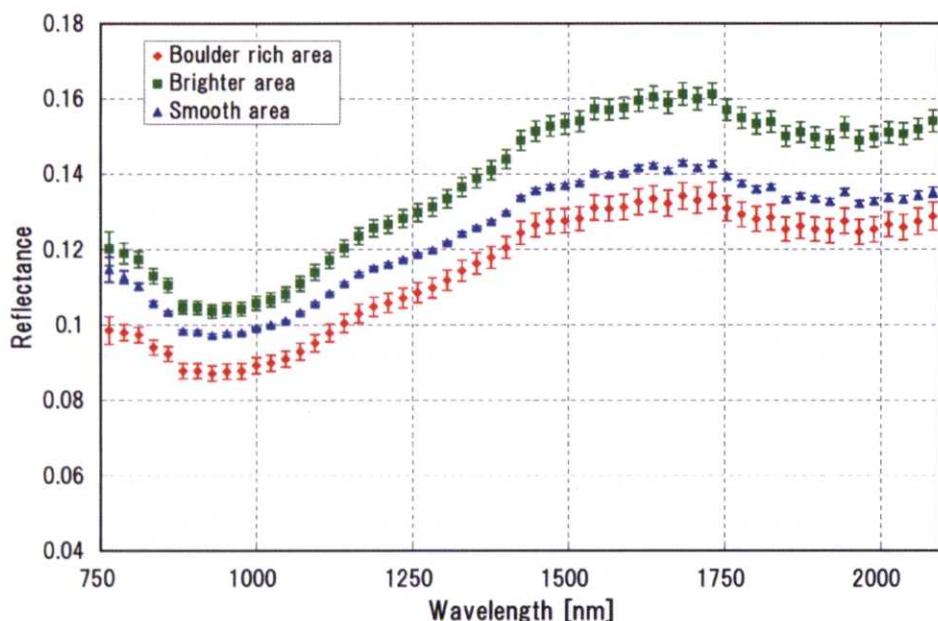


Figure 5-5-11 : Reflectance spectra of boulder area (Boulder-rich area, 2506679712), brighter area (White region, 2506487616) and smooth area (Muses Sea, 2506909945) observed on October 31. Spectra are geometrical corrected using Hapke parameter of NIRS observation. Geometrical condition is $(i, e, a) = (30, 0, 30)$.

10月31日に観測した。Boulder area (Boulder-rich area) , Brighter area (White region), Smooth area (Muses Sea)のスペクトル。スペクトルは NIRS の観測で求めた Hapke parameter を用いて $(i, e, a) = (30, 0, 30)$ の条件に補正してある。使用データは 2506679712 (Boulder-rich area)、2506487616 (White region)、2506909945 (Muses Sea)。

Figure 5-5-8～Figure 5-5-11 のスペクトルを見ると、3つの領域の特徴として、 $1\mu\text{m}$ 吸収帯の深さの強度と反射率の絶対値の違いが同様に見られると同時に、スペクトルの傾きについても違いが見られるものがある。そこでこれらの特徴を定量的に議論するために、幾何学補正したスペクトルに対して、5-4 章で行ったのと同様にコンティニュームを求め、 999 nm における吸収係数 $(C \cdot \ln(\text{Re})) (999)$ と表記を $1\mu\text{m}$ のバンド深さと定義する。また反射率の絶対値の代表としては 1565 nm の値 $(\text{Re}(1565))$ と表記を用いる。スペクトルのスロープについては、 1565 nm の反射率を 764 nm の反射率で割った値 $(\text{Re}(1565)/\text{Re}(764))$ と表記を用いる。4日間のスペクトルそれぞれについて、3つのパラメータを推定した値を Table 5-5-2 に示す。Boulder-rich area、Bright area、Smooth area のそれぞれの観測地点は観測日ごとに同じ地点ではないが、AMICA 画像からは同様の特徴を持った地形と判別されるため、これらの同じ特徴を持つスペクトルの特徴パラメータを4日間の観測について平均したものを Table 5-5-3 に示す。

Table 5-5-2 : Absolute reflectance, spectral slope and absorption band depth of each spectrum.

各スペクトルの反射率・スペクトルスロープ・吸収バンド強度

Oct.26		Boulder	Bright	Smooth
Reflectance	Re(1565)	0.13444	0.14381	0.1304
Slope	Re(1565)/Re(764)	1.233168	1.247268	1.235785
Depth	(C-ln(Re))(999)	0.257827	0.27109	0.234723
Oct.27		Boulder	Bright	Smooth
Reflectance	Re(1565)	0.1405	0.14877	0.13997
Slope	Re(1565)/Re(764)	1.248223	1.231846	1.277565
Depth	(C-ln(Re))(999)	0.253575	0.279862	0.243171
Oct.28		Boulder	Bright	Smooth
Reflectance	Re(1565)	0.14771	0.15362	0.13752
Slope	Re(1565)/Re(764)	1.282094	1.244088	1.306976
Depth	(C-ln(Re))(999)	0.260341	0.278932	0.213546
Oct.31		Boulder	Bright	Smooth
Reflectance	Re(1565)	0.13088	0.15713	0.13983
Slope	Re(1565)/Re(764)	1.328866	1.306368	1.219412
Depth	(C-ln(Re))(999)	0.230919	0.251262	0.236986

Table 5-5-3 : Spectral parameter of typical region.

代表的な3つの領域におけるスペクトルの特徴パラメータ

		Boulder err.		Brighter err.		Smooth err.	
Reflectance	Re(1565)	0.138	0.007	0.151	0.006	0.137	0.004
Slope	Re(1565)/Re(764)	1.27	0.04	1.26	0.03	1.26	0.04
Depth	(C-ln(Re))(999)	0.25	0.01	0.27	0.01	0.23	0.01

Table 5-5-3 をみると、Brighter area は他の2領域に比べて10%ほど明るいことが分かる。また吸収バンド深さは最も深い。一方 Smooth area は吸収バンド深さが最も浅いことが分かる。吸収バンドの深さについては15%ほどの違いがあることがわかる。スペクトルのスロープについては、観測点ごとの分散が大きく有意な議論は出来ないが、Boulder area が他に比べて大きい(赤い)傾向が見られる。

5-5-3 イトカワの表面状態の違い

3つの領域のスペクトルの特徴の違いについて、物理的な状態の違いで説明できるかどうか議論する。

粒子サイズの違いによるスペクトルの特徴の違いについては、Clark (1995)や、Burbine *et al.* (2001)によると、粒子サイズが大きくなるほど反射率が下がり、吸収バンドの深さが相対的に深くなる傾向があるといわれている。これは、粒子サイズが大きいほど、拡散反射における光路長が長くなり、鉱物結晶の内部透過による効果が大きくなるためと考えられる。しかし、この傾向は粒子サイズが 100 μm 程度のサイズまでの傾向で、粒子サイズがさらに大きくなると吸収バンドの深さは、粒子サイズが大きくなるほど浅くなる傾向を示すといわれている(Shkuratov *et al.*, 1999)。

Smooth area の特徴は反射率が低く、吸収バンドが浅い傾向がある。またスペクトルスロープは有意な差ではないが小さい(青い)傾向がある。これらの特徴は粒子サイズが極端に大きい場合(細かい粒子がない場合)に対応していると考えられる。AMICA の画像からは表面の粒子サイズの情報は得られないが mm~cm サイズの比較的粒子サイズのそろった表面の特徴を示していることが指摘されている(Yano *et al.*, 2006)。Smooth area の成因については、まだ議論されている最中であるが、表面重力の小さいイトカワにおいて、隕石などの衝突によって小惑星全体を振動させる際に、比較的流動性の高いサイズの粒子が重力ポテンシャルの低い地域に移動してできるという考え方がある(Fujiwara *et al.*, 2006)。この移動の際に太陽風の影響などで細かい粒子のみが無くなったと考えれば、スペクトルの特徴を説明することができる。

一方 Bright area については AMICA の観測で、反射率の低い他の領域に比べて青い傾向があることが分かっている(Saito *et al.*, 2006)。これは宇宙風化の進行度が低いことで説明できると考えられている。宇宙風化が進行するにつれて、反射率が低くなると同時に吸収バンドの深さが浅くなる傾向があることが知られており(Adams and McCord, 1971)、Brighter area の宇宙風化進行度が低いことでスペクトルの特徴を説明することができる。

逆に Boulder rich area については宇宙風化進行度が高いことが考えられるが、スペクトルスロープは他に比べて若干大きい(赤い)ものの、有意な差になっていないためはっきりしたことは言えない。そこでよりクローズアップして観測したデータを用いて、Brighter area と Boulder rich area のスペクトルを比較してみる。

5-5-4 クローズアップ観測データの解析

Figure 5-5-12 と Figure 5-5-13 は 11 月 12 日に観測した Boulder rich area と Brighter area の AMICA の画像および NIRS のフットプリントである。11 月 12 日は Touch down リハーサルの 2 回目の降下中の観測で、Bolder area の観測は高度 2.3 km の地点、Brighter

area の観測は高度 2.8 km の地点での観測である。太陽位相角は約 16 度である。

Figure 5-5-14 に NIRS で観測したこれら領域の反射スペクトルを示す。Figure 5-5-12 を見ると、NIRS の視野サイズより大きなボルダーがごろごろしている表面を観測していることがわかる。Figure 5-5-14 において、Brighter area のスペクトルに比べて、Boulder area のスペクトルの分散値が大きいのは、観測データスタック中に NIRS のフットプリントが移動して、フットプリントのローカルな入・反射角条件の変動が Brighter area に比べて大きいためと考えられる。

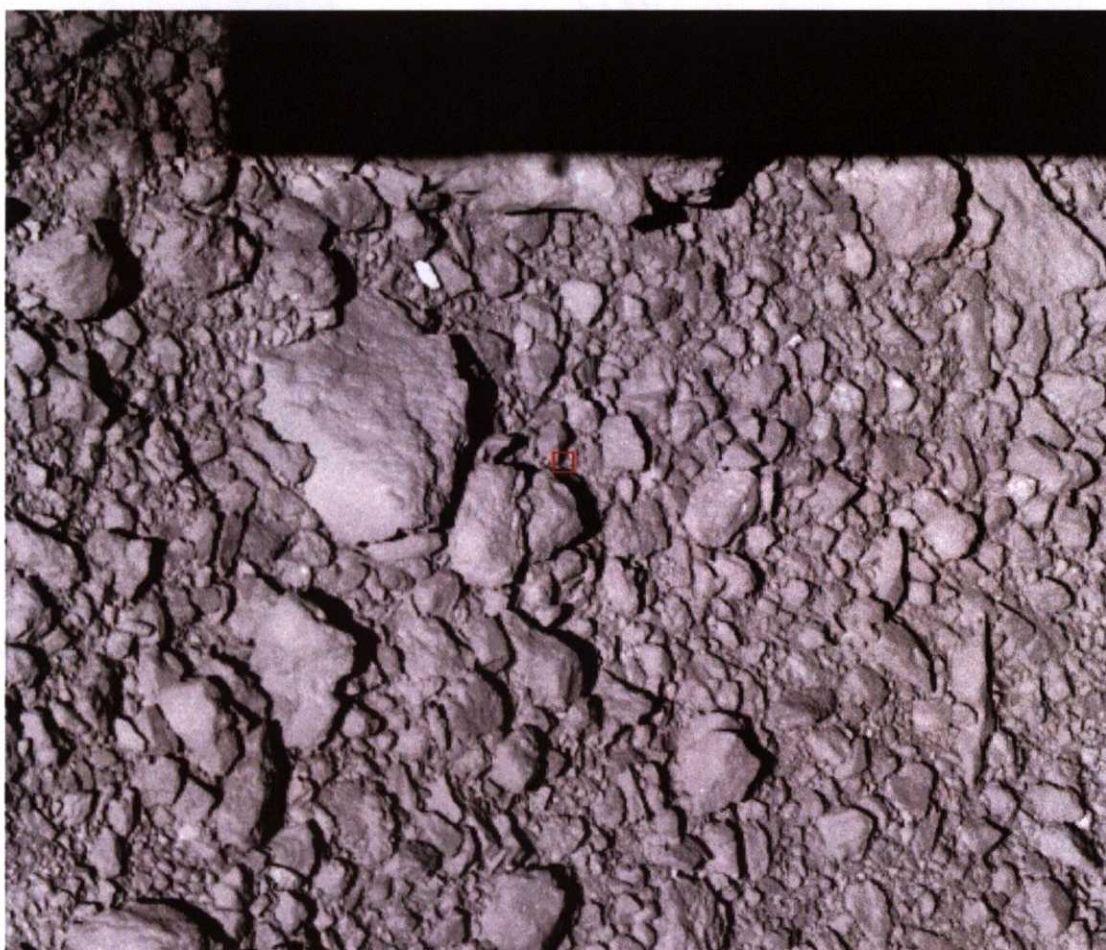


Figure 5-5-12: Footprint (red square) of Boulder area observed by NIRS on November 12. Image is obtained by AMICA (ST_2539429953).

11月12日に観測した Boulder area の NIRS フットプリント。赤い枠が AMICA 撮像時の NIRS のフットプリント AMICA 撮像データは ST_2539429953。

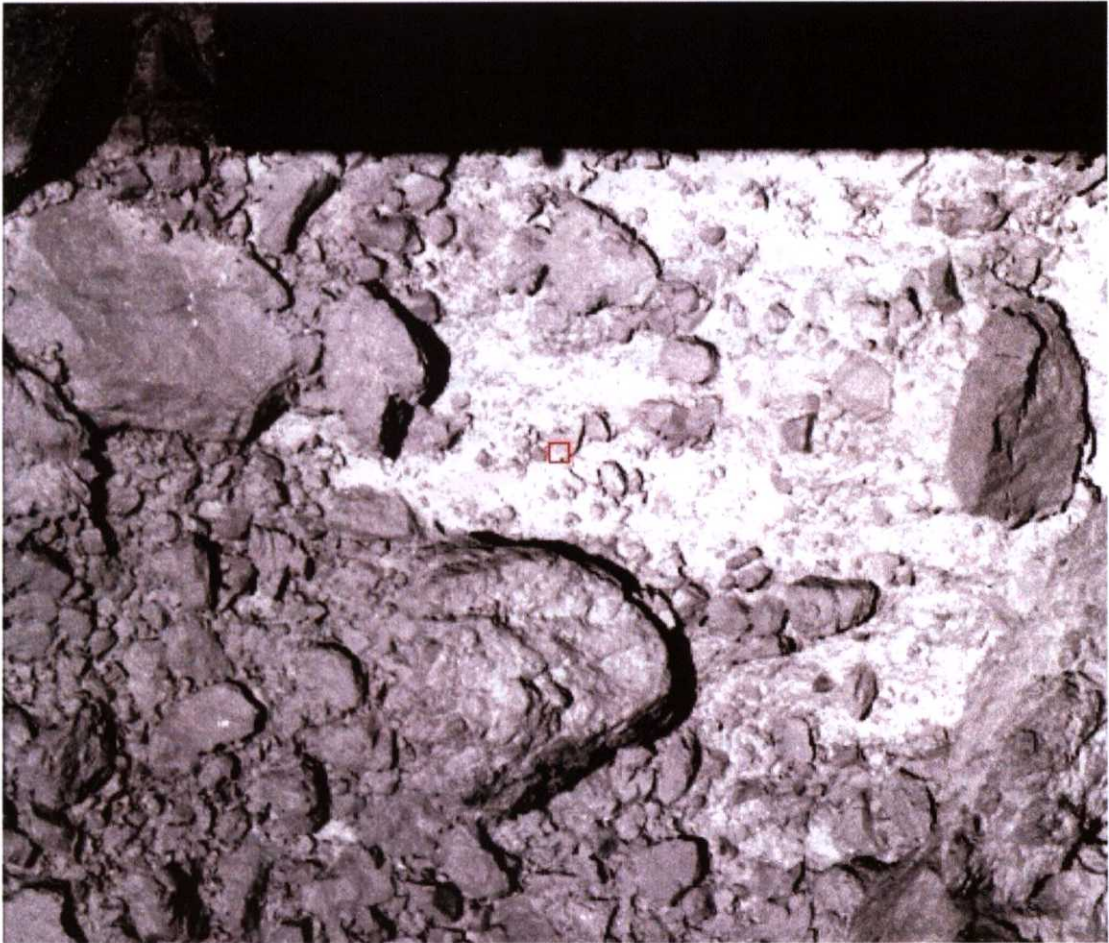


Figure 5-5-13 : Footprint (red square) of Brighter area observed by NIRS on November 12. Image is obtained by AMICA (ST_2539467169).

11月12日に観測した Brighter area の NIRS フットプリント。赤い枠が AMICA 撮像時の NIRS のフットプリント AMICA 撮像データは ST_2539467169。

Boulder area のスペクトルは Brighter area のスペクトルに比較すると、反射率が低く、 $1\mu\text{m}$ 吸収帯の深さが浅いだけでなく、スペクトルの傾きも急になっている。

Figure 5-5-14 には 11月12日に観測した Boulder area と Brighter area のスペクトルにあわせて、9月21日の赤道スキャン時の平均スペクトルおよび Alta'ameem の反射スペクトルと合わせて示してある。位相角の違いはあるが、Brighter area の反射率は Boulder area のスペクトルより明るく、その間に赤道スキャンの平均のスペクトルがある。また平均のスペクトルの反射率は、両者のうちの Boulder area の反射率に近い。Alta'ameem 隕石の反射率は、他の3つのスペクトルに比べて最も明るい。

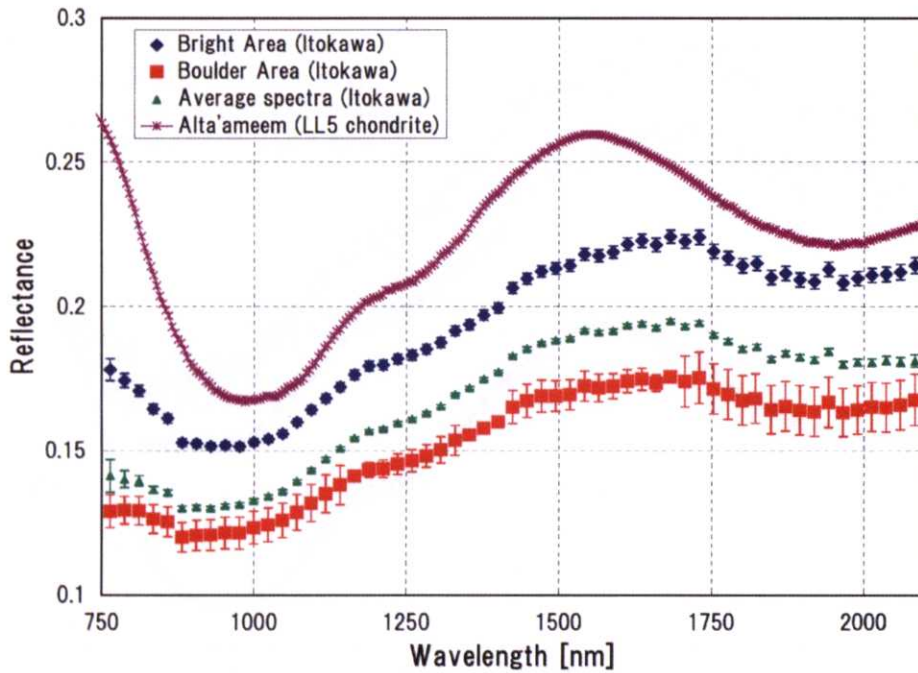


Figure 5-5-14 : Reflectance spectra of boulder area (2538851750) (red) and brighter area (2538933574) (blue) observed on November 12, and equatorial scan average spectrum obtained on September 21. Also plotted spectrum of Alta'ameem LL5 chondrite powder sample (purple).

11月12日に観測した Boulder area(2538851750)(赤)と Brighter area(2538933574)(青)のスペクトルと 9月21日に実施した赤道スキャン時の平均スペクトル(緑)および Alta'ameem 隕石の反射スペクトル(紫)の比較。

この4つのスペクトルを764 nm (NIRSの最短観測波長)で規格化したのが Figure 5-5-15である。Brighter areaのスペクトルの傾きは Boulder areaのスペクトルの傾きより小さく(スペクトルが青く)、その間に赤道スキャンの平均のスペクトルがある。また平均のスペクトルの傾きは、両者のうちの Boulder areaのスペクトルの傾きに近い。Alta'ameem 隕石のスペクトルの傾きは、他の3つのスペクトルに比べて最も小さい。

この傾向は、Boulder areaのスペクトルが宇宙風化作用によって、反射率の低下とスペクトルの赤化を起こしていると考えたと説明が可能である。Brighter areaのイトカワ表面全体に占める割合は低いので、イトカワ全体の平均スペクトルは Boulder areaのスペクトルに近くなる。

これまでの地上観測でもイトカワの全球平均のスペクトルは普通コンドライトの反射スペクトルと傾きまでは一致せず、イトカワの表面は普通コンドライトが宇宙風化したものだと言う主張があった (Binzel *et al.*, 2001a)。今回の観測で小惑星の表面に宇宙風化の進行度の違う領域があることを発見できたと考えられる。

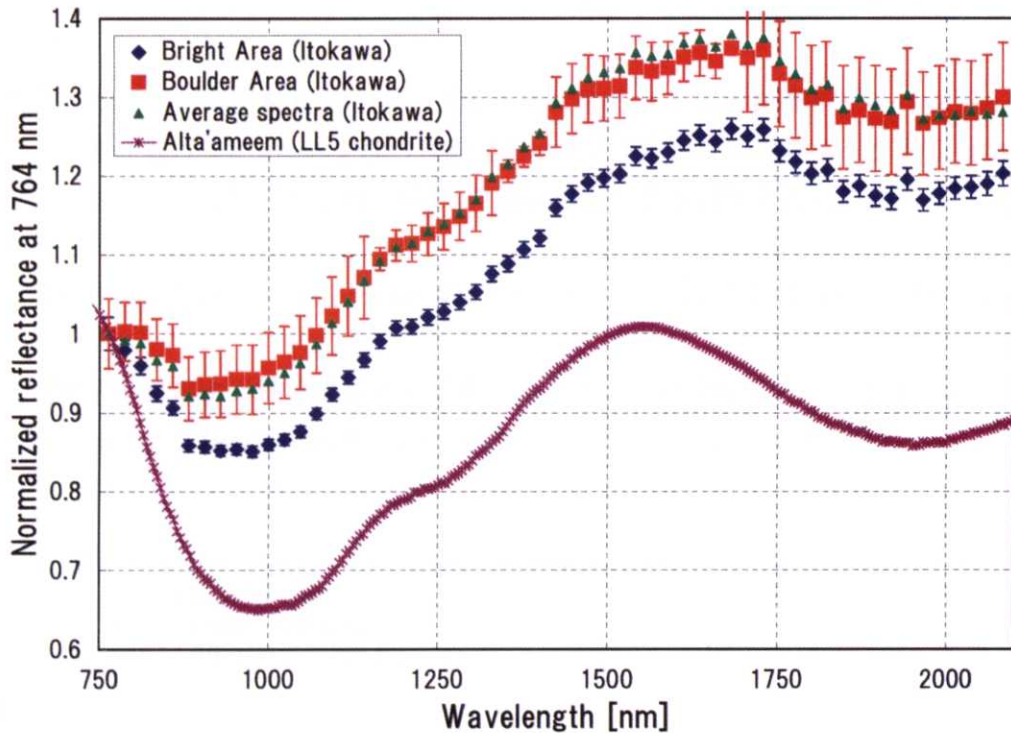


Figure 5-5-15 : Reflectance spectra of boulder area (red) and brighter area (blue) observed on November 12, and equatorial scan average spectrum obtained on September 21. Also plotted spectrum of Alta'ameem LL5 chondrite powder sample (purple). All spectra are normalized at 764 nm.

11月12日に観測した Boulder area(赤)と Brighter area(青)のスペクトルと9月21日に実施した赤道スキャン時の平均スペクトル(緑)および Alta'ammem 隕石の反射スペクトル(紫)の比較。Figure 5-3-14 を 764 nm で規格化。

反射率の高い領域がどうやって形成されたかについては、まだ議論中であるが、イトカワの表面が長期間ボルダで覆われていたことによって、Boulder area は宇宙風化の進行度が高く、何らかの原因によるボルダの移動によって、その下の宇宙風化の進んでいない部分が露呈したと考えれば、この違いを説明することはできる。ただし、反射率の高い領域のスペクトルは、反射率の絶対値やスペクトル傾きでは、普通コンドライトのスペクトルと完全には一致せず、ある程度宇宙風化は進行していると考えられる。

5-5-5 イトカワ表面の宇宙風化進行度の違い

そこで、前節で議論した 11月12日の2つのスペクトルについて、イトカワの宇宙風化していない物質として Alta'ameem 隕石を仮定して、それぞれの場所の宇宙風化の進行度

を見積もる。宇宙風化のモデルとしては5-2章の議論でも用いた Hapke (2001)のモデルを採用する。

解析にあたって、地上較正データの不確かさによるノイズの影響や、スペクトルの傾きに対する影響を避けるため、5-2章の議論で用いた、イトカワの平均スペクトルと地上観測データの比較によって得られた補正係数(Figure 5-2-2)をNIRSで得られたスペクトルにかけて解析を行う。

また幾何学補正も行い、Alta'ameem 隕石のスペクトル測定条件の $(i, e, a) = (30, 0, 30)$ に条件を合わせた。

地上観測データによる補正係数による補正および、幾何学補正を行った11月12日観測のBrighter area と Boulder rich area のスペクトルを Figure 5-5-16 に示す。

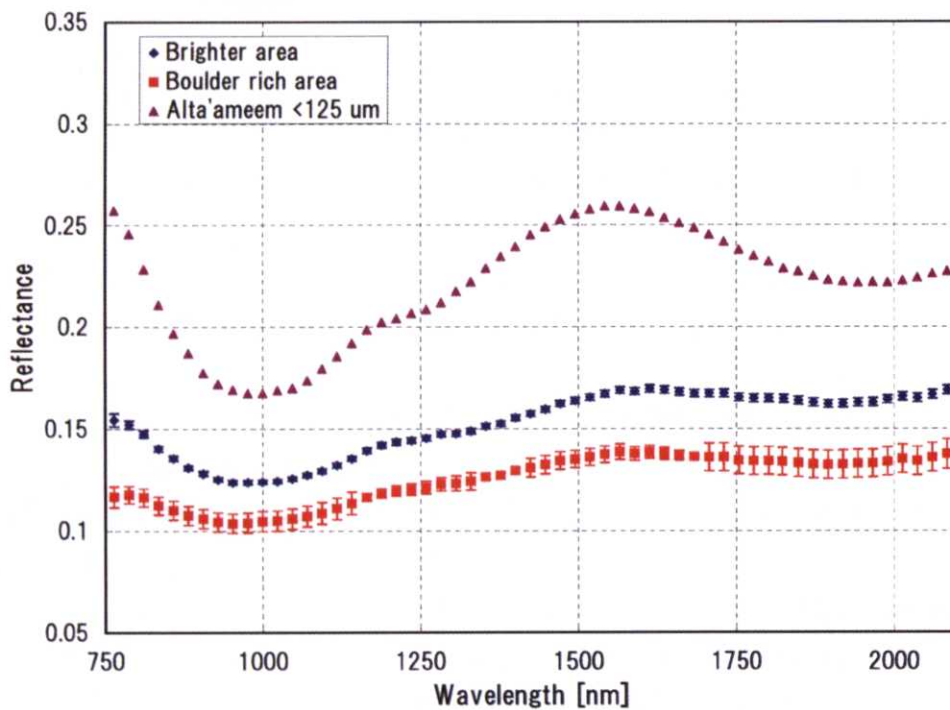


Figure 5-5-16 : Reflectance spectra of boulder area (red) and brighter area (blue) observed on November 12, and equatorial scan average spectrum obtained on September 21. Spectra are corrected geometrically and reduced by correction factor shown in Figure 5-2-2. Also plotted spectrum of Alta'ameem LL5 chondrite powder sample (purple).

11月12日に観測したBoulder area(赤)とBrighter area(青)のスペクトルとAlta'amem 隕石の反射スペクトル(紫)の比較。NIRSで観測したデータは幾何学補正とFigure 5-2-2に示した correction factor の処理を行っている。

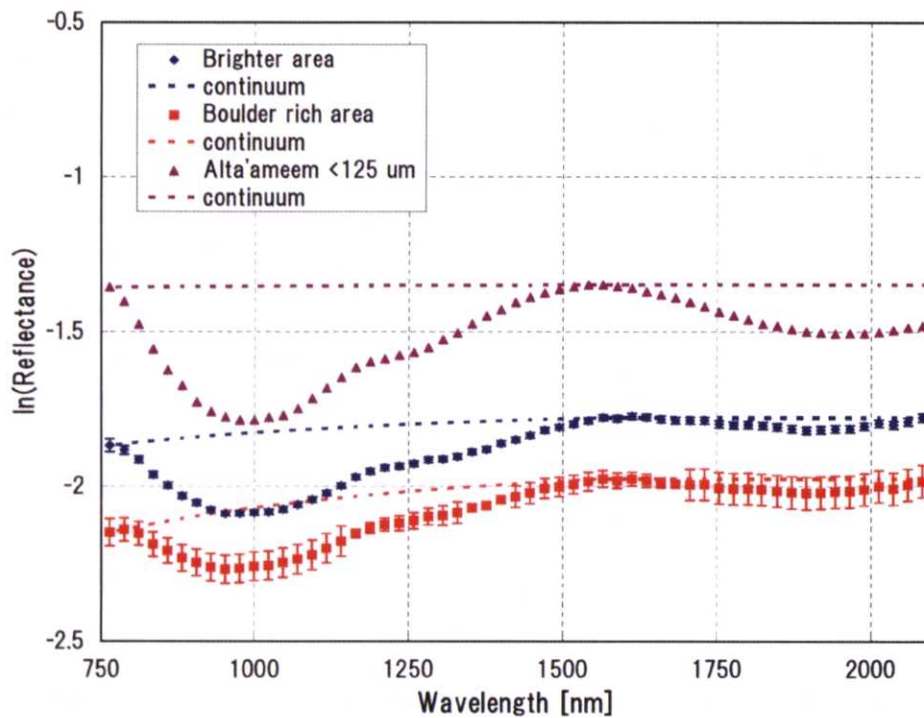


Figure 5-5-17: Natural log reflectance spectra shown in Figure 5-5-16. Also plotted their continuum.

自然対数表示の反射スペクトル。データは Figure 5-5-16 と同じ。それぞれのスペクトルのコンティニュームもあわせて表示した。

Figure 5-5-16 のデータについて自然対数を取り、それぞれのコンティニュームとあわせて表示したのが Figure 5-5-17 である。

さらに Figure 5-5-17 において、反射スペクトルとコンティニュームの差をプロットしたのが Figure 5-5-18 である。

Brighter area も、Boulder rich area も $1\mu\text{m}$ の吸収バンドの形は Alta'ameem 隕石の吸収バンドと相似形で、スケールングファクタがそれぞれ 0.60 および 0.44 でよく一致する。 $2\mu\text{m}$ の吸収バンドの形が良く合わないが、これは $2\mu\text{m}$ 吸収バンドのコンティニュームの決め方に原因があると考えられる。

2つの領域のスケールングファクタは、5-4 章で求めた平均スペクトルにおけるスケールングファクタの 0.49 に対して、Bright area は大きく、Boulder rich area は小さくなっている。これは、Brighter area の表面はイトカワの平均に対して粒子サイズが大きい、あるいは、宇宙風化進行度が低い、のどちらかまたは両方の可能性があると考えられる。また Boulder rich area はその逆で、粒子サイズが小さいか、宇宙風化の進行度が高いと考えられる。

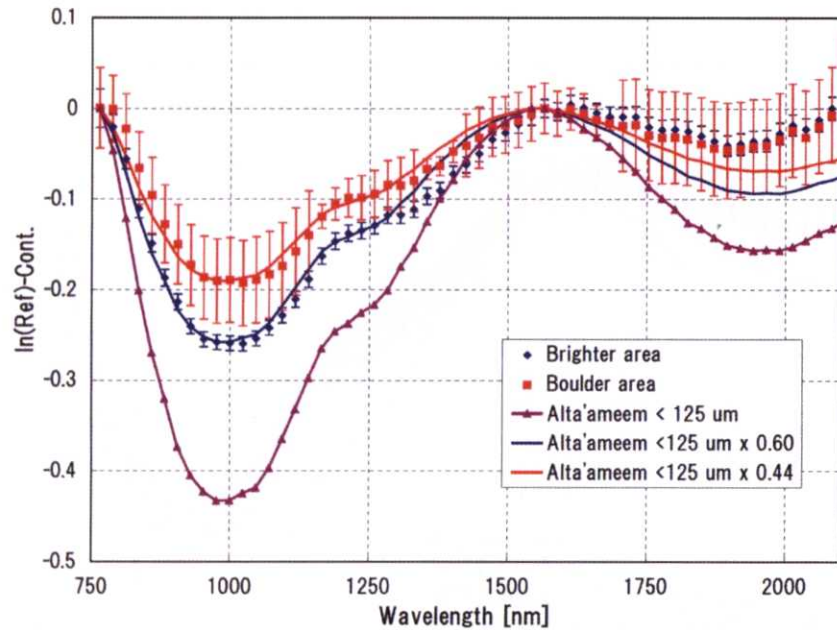


Figure 5-5-18 : Natural log average reflectance spectra of Brighter area (blue diamond) and Boulder rich area (red square) observed by NIRS on November 12. Background continua are subtracted. Also plotted continuum-removed of an Alta'ameem LL5 chondrite sample (purple) and scaled one (blue and red solid line).

対数スケールであらわしたイトカワの反射スペクトル(11月12日に観測した Brighter area (青い菱形) と Boulder rich area (赤い四角))。コンティニューム成分は取り除いてある。実線は LL5 普通コンドライト(Alta'ameem)粉末の反射スペクトル(紫)とその縦軸のスケールを 0.60 倍したもの(青の実線) と 0.44 倍したもの(赤の実線)。

そこでこの2つの領域のスペクトルについて、スペクトルの傾きも含めて Hapke (2001) の宇宙風化モデルでフィッティングした結果が Figure 5-5-19 である。

モデル関数は 5-2 章で述べたように、反射スペクトルの自然対数が

$$\ln R(\lambda) = - \{ a_h(\lambda) + (36 \cdot \pi / \lambda) \cdot \varphi \cdot z(\lambda) \} \cdot d_e$$

と表されるとしたものをを用いる(Hapke, 2001)。

ここで $a_h(\lambda)$ は Alta'ameem 隕石の単位透過長さあたりの吸収係数とする。ここで用いている Alta'ameem 隕石のサンプルは粒子サイズが 125 μm 以下のサンプルであるが、このサンプルにおける拡散反射光の平均透過光路長を最大粒子サイズの半分の 62.5 μm であると仮定する。

平均透過光路長を d_e 、微小金属鉄粒子の存在比(体積割合)を φ として、 d_e と φ の2つを自由パラメータとしている。

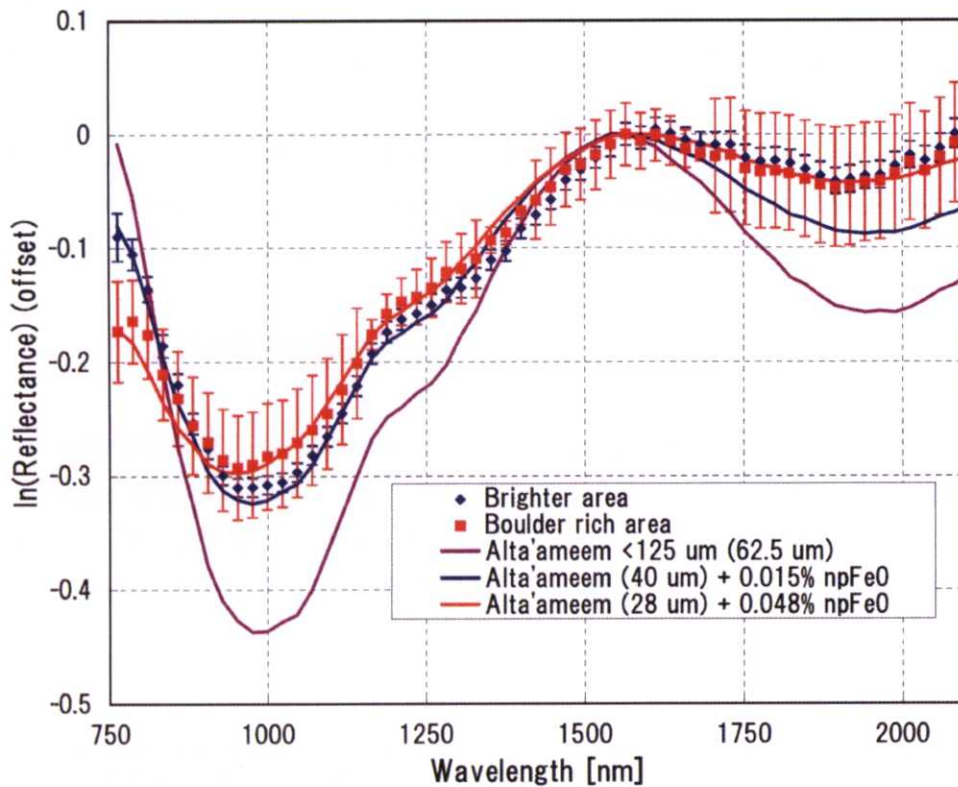


Figure 5-5-19 : Natural log average reflectance spectra of Brighter area (blue diamond) and Boulder rich area (red square) observed by NIRS on November 12. Data point is offset to 0 at 1565 nm. Also plotted of an Alta'ameem LL5 chondrite sample (purple). Blue and red solid line are model curve fitted to spectra of Brighter area and Boulder rich area respectively.

自然対数スケールであらわしたイトカワの反射スペクトル(11月12日に観測した Brighter area (青い菱形) と Boulder rich area (赤い四角))。1565 nm でゼロになるようにオフセットしてある。紫の実線は LL5 普通コンドライト(Alta'ameem)粉末の反射スペクトル。青と赤の実線は Brighter area と Boulder area に最も良く合う宇宙風化モデルカーブ。

Figure 5-5-19 より、Brighter area の平均光路長(粒子サイズ)は 40 μm で微小金属鉄粒子の存在比は 0.015%、Boulder rich area の平均光路長(粒子サイズ)は 28 μm で微小金属鉄粒子の存在比は 0.048%という結果が得られた。

得られた宇宙風化度は月に比べると圧倒的に低い(Pieters *et al.*, 2000)が、Brighter area も Boulder rich area も宇宙風化は進行していることが分かる。地上観測の結果からは、Binzel *et al.* (2001a)が、イトカワの平均的な宇宙風化進行度を微小金属鉄粒子の存在比として 0.05%と仮定して議論しているが、今回求めた Boulder rich area の値に近い。Boulder rich area はイトカワの表面の大部分を占めているので、この結果は妥当であると言える。

一方 Brighter area は Boulder rich area に比べて宇宙風化進行度が低い領域であることが分かった。表面年代の絶対値については不明であるが、金属鉄粒子の存在比が時間に比例して増加すると仮定すると、Brighter area の表面年代は Boulder rich area の表面年代に比べて約 3 分の 1 であるということになる。

イトカワの表面の他の場所でも同様な違いを見ることができ、Hiroi *et al.* (2006) では Tsukuba 領域の Brighter area と Boulder rich area の宇宙風化進行度を見積もっているが、ほぼ同様の結果が得られている。

5-5-6 イトカワ表面の鉱物組成の違い

3つの代表的な領域である、Boulder area、Brighter area、Smooth area はスペクトルの傾きや、 $1\mu\text{m}$ 吸収帯の深さおよび反射率の絶対値が違い、その原因は表面状態の違いで説明できることは、これまでに議論した。これら 3つの領域の鉱物種の違いについて議論するために、Figure 5-5-20 に 10月26,27,28,31日に観測した3つの領域の吸収係数の強度比を示す。

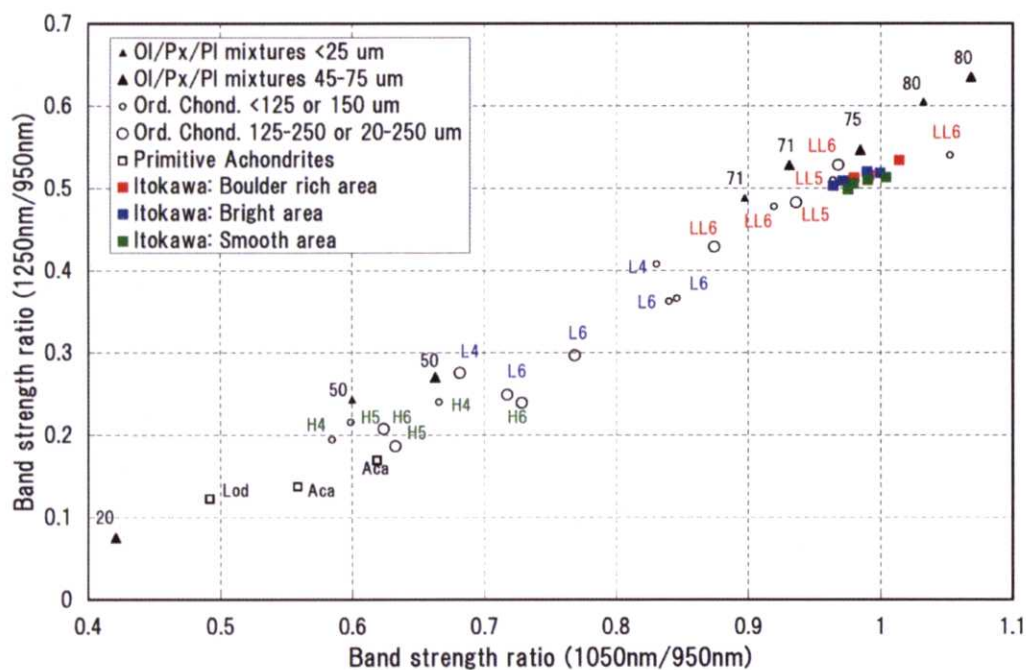


Figure 5-5-20: Natural log absorption strength at 1050 and 1250 nm relative to that 950 nm of Itokawa spectra of typical three areas (green blue and red square) acquired by NIRS on October 26, 27, 28, and 31. The other data are same as Figure 5-3-12.

10月26,27,28,31日に観測した3つの領域の吸収係数強度比(赤・青・緑の四角)。それ以外は Figure 5-3-12 と同じ。

図からわかるように、3つの3バンド強度比には大きな違いはなく、1 μm 帯の特徴を見る限り、イトカワ表面には場所による鉱物種の大きな違いはなさそうであることがわかる。今後、NIRSで取得した全スペクトルを詳細に見ていかなければ、最終的なことは言えないが、これまでのデータを見る限りは、イトカワの表面には大きな鉱物種の違いはなく、熔融による分化の痕跡は見られない。このことから、イトカワは始原的な表面を持ち、対応する隕石タイプが普通コンドライトであるという考えを支持するものと考えられる。