

特集 「さあ、小惑星に行こう!—小惑星サンプルリターン計画」

可視カメラ

中村 士¹

1. はじめに

2002年1月に打ち上げられ2003年9月に小惑星ネレウスに到達する計画のMESES-C探査機には、航法とサンプル採取地点を探すための工学機器として可視CCDカメラが搭載される。私たちはこのカメラに多バンドのカラーフィルターホイールを装着して、科学観測を行う理学機器として使用する予定である。その内容は既に平成8年4月の冊子「MUSES-C計画概要」に述べられているので、ここではその後の進展を中心に紹介する。

2. 可視カメラの主な探査テーマ

MUSES-Cに搭載される理学機器の中では、カメラからの情報が量的にも質的にも最も多様である。そこで、ここでは形態学的な観測と、測光学的な観測とに分けて議論した。この分類は、後で述べるカメラ較正の問題とも関係している。一方、測定方法やそれらを元に行なうサイエンスの面からは、このように単純に二分はできないので、これは、あくまでも便宜的な分類である。カメラの観測を項目別にまとめると、

(A) 形態学的観測項目

- ・全体形状とサイズ
- ・自転周期, 自転軸, 非主軸回転の有無
- ・全球的マッピング(ステレオ画像解析)

- ・大規模な地形, 大型クレータの構造, grooves, ridges
- ・1m級サイズまでのクレータ統計, クレータ形態学
- ・レゴリスの有無と厚さ, クレータ縁での岩盤露頭
- ・微小衛星の有無
- ・ダストリング／雲の探査

(B) 測光学的観測項目

- ・多バンドフィルターによる表面カラー分布と地質・鉱物の分布
- ・カラー分布と地形との相関
- ・波長0.7~0.8 μm , 0.9~1.1 μm における鉱物吸収バンド
- ・宇宙侵食(space weathering)によるスペクトルの赤化
- ・大きな位相角での位相角—偏光度曲線の観測と表面物質の光学定数／粒度
- ・遠距離接近フェーズでの長時間連続変光曲線の観測

となる。以下、順次解説してゆく。

¹国立天文台光学赤外線天文学研究系

3. 形態学的観測

3.1 全体形状、自転状態の決定とglobal mapping

ネレウスの大きさと全体形状の知識は、この小惑星に関するもっとも基本的なデータである。また、自転速度、自転軸の情報も、重要な物理量である。これらのデータは、この小惑星の起源と進化を議論する科学目的のためだけに必要なのではない。探査機がサンプルを採取するために接地する適当な地点を選定するには、まず、表面全体の地図を作らねばならない。採取地点に探査機が安全に近づくには、自転の状態を正しく知らないとぶつかる危険性もある。こうした工学航法上の目的で撮られる画像データが、私たちの目的にも合う場合は、工学データを利用できる。しかし、そのようなケースは少ないであろうから、理学側も独自に全体形状を把握する観測をすることになる。特に、工学側の観測は地形の認識が主目的なので、測光学的データとしては役立たない。

探査機ガリレオが近傍通過で撮像に成功した小惑星(ガスプラ、アイダ)や、NEAR探査機の目標小惑星(マチルダ、エロス)は、いずれも地上観測歴の長い小惑星で、事前にサイズ、形状、自転状態がかなり良く分っていた。これに反して、ネレウスは近年発見された直径1kmの微小小惑星である。このため、MUSES-C打ち上げの年になっても、自転軸の方向などが判明している保証はない。よって、工学/理学の双方の目的のために、“その場”(in situ)で全体形状を把握するglobal mappingの探査計画を慎重に立てる必要がある。

カメラの視野にネレウス全体が写る約20kmの距離から、ネレウス上の経度にして5~10度の間隔で表面を撮影する予定である。自転軸がカメラ光軸に対して直角に近い時は、小惑星の自転に伴って極域を除くほぼ全表面が見られる。うまくいけば、極域へも探査機が移動して観測できるであろう。他

方、自転軸が太陽の方向に近い場合は最悪である。この場合には、探査機がネレウスに滞在する約2ヶ月の間、日影の半球はほとんど日があたらず、観測できない可能性がある。全体形状、つまり体積が測定できなければ、内部物質の推定に重要な平均密度の算出も困難になる。探査機に搭載されるライダーで、影の部分を粗くスキャンし、カメラで見えない所の形状をライダーで測定することも提案されている。しかし、これはライダーとカメラが自由に振り回せるジンバルに乗っている場合にのみ可能なことである。大規模な地形、grooves, ridges, 大型クレータ等の立体構造は、ステレオ画像を撮影し、解析すれば求められる。ステレオ写真の基線長は、ネレウスと探査機の相対運動を利用すれば比較的自由に選べるが、ステレオ解析するには、カメラからネレウスまでの距離をライダーで少なくとも数点測ることが必要である。

3.2 クレータ統計

表面クレータのサイズ分布は、小惑星の長期的衝突進化の研究や、レゴリス生成に関して重要である。また、地形データの中では、最も定量的な議論のできる分野でもある。特にMUSES-Cのようなランデブーミッションでは、m級、サブm級のクレータ統計が興味深い。このサイズ領域のクレータ分布は、今までの探査機観測では得られていないので、小クレータ形成の相似則の検証、微小重力場でのレゴリスの保持などについて、新しい知見が開ける筈である。

後に述べるカメラの仕様では、20kmの高度から分解できる最小のクレータ直径は5~10mである。このような細かい地形の見え方は、太陽位相角に強く依存する。位相角が0度に近いと、影ができないだけでなく、アルベドの違いによる表面輝度の差も目立たなくなる。位相角が小さい時と大きい時の見え方の違いを、バイキング号が撮影した火

星衛星フォボスを例にとって示した(図1). MUSES-Cの場合も, 航法やクレータ統計のために使用する画像は, 太陽直下でなく位相角30度あたりで撮影することになる. カメラの視野に, 小惑星の一部しか写らない近距離では, 全表面をカバーするのに必要な膨大な枚数の画像を撮影することはできない. このため, いったい何枚撮影すれば良いのかが, 探査運用の面からも問題となる. ここでは定量的な評価として, “微小クレータの直径の累積度数分布を作る際に十分な数のクレータが写る” という基準で試算してみた. 探査機ガリレオが, 小惑星ガスプラで観測したクレータの累積度数分布[1]を想定して, これが1m級まで外挿できると仮定すると, 次のようになる:

直径の範囲	N(個)/km ²
20-10m	3600
10-5	2.7×10^4
5-2	1.7×10^6
2-1	2.9×10^8

1 km² は, 高度10kmの距離からカメラ視野に丁度収まる範囲である. ちなみにアイダとダクティルで得られたクレータの累積度数分布を想定すると, 上表値の約2倍の数になる. 高度2kmでは1mまでのクレータが分解できて, 表から推定して, 直径1-2mのクレータが視野内に約10万個写る

筈である. ポアソン分布の場合, クレータ数が1万個なら統計的揺らぎは1%である. このことから, クレータ統計に1%の誤差を許す限り, 高度数km以下の撮像では, たくさんの画像を撮る必要はないことになる.

3.3 レゴリス

小天体の表面は, 隕石の衝突で粉砕され, レゴリスと呼ばれる微粉末の表土で覆われていると考えられる. この厚さがどの程度かを知ることは, 小惑星の衝突進化を明らかにする観点だけでなく, 探査機のサンプル採取地点を決定するためにも重要である. キロメートルサイズの天体では, レゴリスは厚くないという結果が報告されている[2]. レゴリスの厚さは, クレータの縁などで岩盤が露出している所が見つかれば, かなりはっきりするだろう. ネレウスが rubble pile のようないくつかのブロックからできていれば, 場所によってレゴリスの厚さが違うかもしれない.

3.4 衛星, ダストリングの探査

小惑星アイダの探査では, ダクティルと呼ぶ衛星が発見された. ネレウスの表面重力は, アイダと比べてずっと小さいので, 衛星を保持することは難しい. しかし, メインベルトの小惑星と

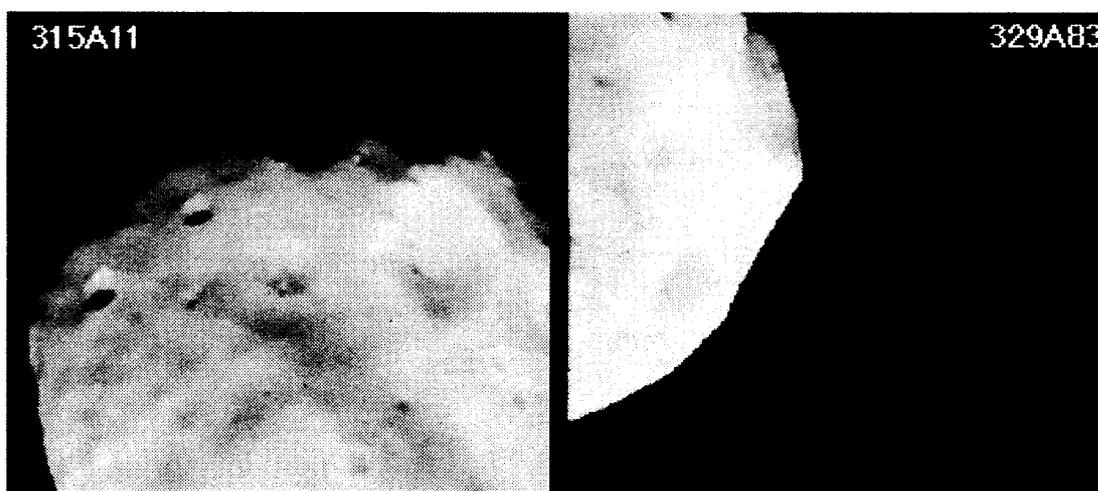


図1. 衛星フォボスの位相角による見え方の違い(NASA, PDSのCD-ROMによる). 右図が位相角が小さい場合.

比べて、ネレウスの様な地球接近小惑星では、激しい衝突を経験した可能性がある。この際に、ネレウスが未知の衛星を捕獲した可能性を否定する理由はない。ネレウスに関するHillの安定領域が、カメラ視野いっぱいに見る700~1300kmの距離から、未知の衛星を探すのが最良であろう。カメラの限界等級から推定して、直径1~2m以上の衛星があれば充分検出できる。

小天体の周囲には、微小隕石の衝突で生成されたダストリング(雲)が存在すると考えられる。PHOBOS-2探査機による火星衛星フォボスの探査では、ダストリングの存在を示唆する間接的な証拠が、プラズマ計測で得られている。ダスト雲の明るさ(粒子密度)は、小天体表面への隕石の衝突フラックスが増加すれば増す等である。そこで、ダスト雲を探すとすれば、衝突フラックスが大きい時期が望ましい。最も衝突が増加するのは、流星群との遭遇の時、通常時の数100-1000倍に達する。図2には、遭遇条件を主要な流星群20個について調べた結果をまとめた。ここでは、遭遇している期間を、流星群の軌道長半径(a)の関数として横軸で示した。MUSES-Cの探査期間中に、ネレウスは、しぶんぎ群、ふたご群など6個の流星群と遭遇することが分った。また、小天体周囲のダスト雲の力学的寿命の計算[3]と比較してみると、流星群との遭遇でダスト雲の密度の増大が現われるのは、大きさが数 μm 以下の成分だけである。これら

は、位相角の大きな所から前方散乱光を測定して探すのが適当である[4]。逆に、流星群遭遇の時にダスト雲を探して見つからなければ、通常時に発見される可能性はずっと低いと言える。一方、小惑星エロスにランデブーする探査機NEARは、ほぼ1年近い期間、エロスに滞在する。しかしながら、計算した20個の流星群の内、この間にエロスに遭遇するのは僅か1個であった。よって、エロスの探査では既知の流星群によるダスト雲を発見する見込みは低い。これに対して、ネレウス近傍のダスト雲探査は実行してみる価値があるだろう。

なお、MUSES-Cがネレウスとランデブーする時期は、太陽、地球、ネレウスがほぼ正三角形の配置を取る。正三角形の位置(円制限三体問題のL4, L5ラグランジュ点)には、太陽と木星の場合には、多くのトロヤ群小惑星が存在する。太陽と火星の場合でも、最近2個のトロヤ群小惑星がL5の位置に発見されている。木星や火星よりも円軌道に近く、火星よりも質量の大きな地球のラグランジュ点に、同様な小天体があってもおかしくないが、現在はまだ発見されていない。また、この位置付近に、ダストの雲(秤動雲)がたまっている可能性も議論されている。MUSES-Cが、ネレウスとの遭遇の時に、この問題に対する何らかの手がかりをつかむかも知れない。秤動雲が観測されない場合でも、その密度の上限値は求められるであろう。

4. 測光, 偏光観測

4.1 多バンド分光測光による表面カラー分布

ネレウスについて今まで観測されたおおまかな反射スペクトルからは、少なくともネレウスがS型ではないという程度のことしか分らない。私たちは、表面のカラー分布と地質・鉱物の分布を対応づけるために、ECAS相当の6~8バンドフィルターでネレウス表面を撮像したいと考えている(ECAS

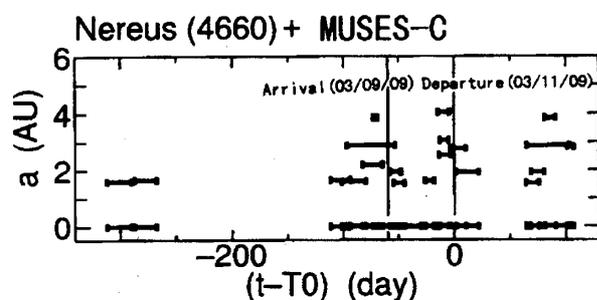


図2. ネレウスの探査期間と主要な流星群との遭遇時期(横軸の0はネレウスの近日点通過の時刻)。全部のバーを軌道長半径 $a=0$ 軸上に重ねて表示した。

とは、小惑星の taxonomic type を決めるためのサーベイ用に開発された8バンドの測光システムである [5]。ECASで観測された約600個の小惑星の反射スペクトルと、探査結果を定量的に比較できるように、後述するようなECAS標準星による校正をする予定である。

図3に代表的な隕石の反射スペクトルを、ECASバンドに対して示した。炭素質コンドライトに見られる $0.7\sim 0.8\ \mu\text{m}$ の吸収(層状珪酸塩鉱物)や, mafic silicate による $\sim 0.95\ \mu\text{m}$ の吸収があれば, ECASバンドで捉えられることが分る。このバンドでマッピングした画像から, 上記物質の相対存在度を知ることができるだろう。また, 各バンドの強度が長波長側に向かって強くなる傾向(赤化)を調べることで, 赤化の原因とされる space weathering の程度を議論することも可能になるであろう。サンプル採取地点付近の分光特性を, カメラで丁寧に測定することも大切である。“回収サンプルの実験室スペクトルが測定されれば, 探査カメラで得

られたデータとの関係が明らかとなり, この結果を, 他の小惑星の地上観測に応用する道が開ける”からである。

表面カラーと地形との相関を明らかにすることも重要である。ガスプラやアイダの探査では, ある半球と他の半球のカラーが系統的に異なったり, クレータ周辺のカラーが周囲と大きく違っていた点が報告されている。ネレウスは今まで探査された小惑星のようにS型ではなさそうである。この意味でも, これまでの探査小惑星とは違う結果が期待され, 興味深い。

4.2 偏光観測

小天体表面からの反射光の偏光観測を行なうことにより, 表面物質の光学特性, 表面粒子の粒径分布や空隙率の情報が得られる。これら物理パラメータを正しく推定するには, 広い範囲の位相角と入射角, 反射角で測定することが本質的である。図4は小惑星トータティスの位相角・偏光度曲線の

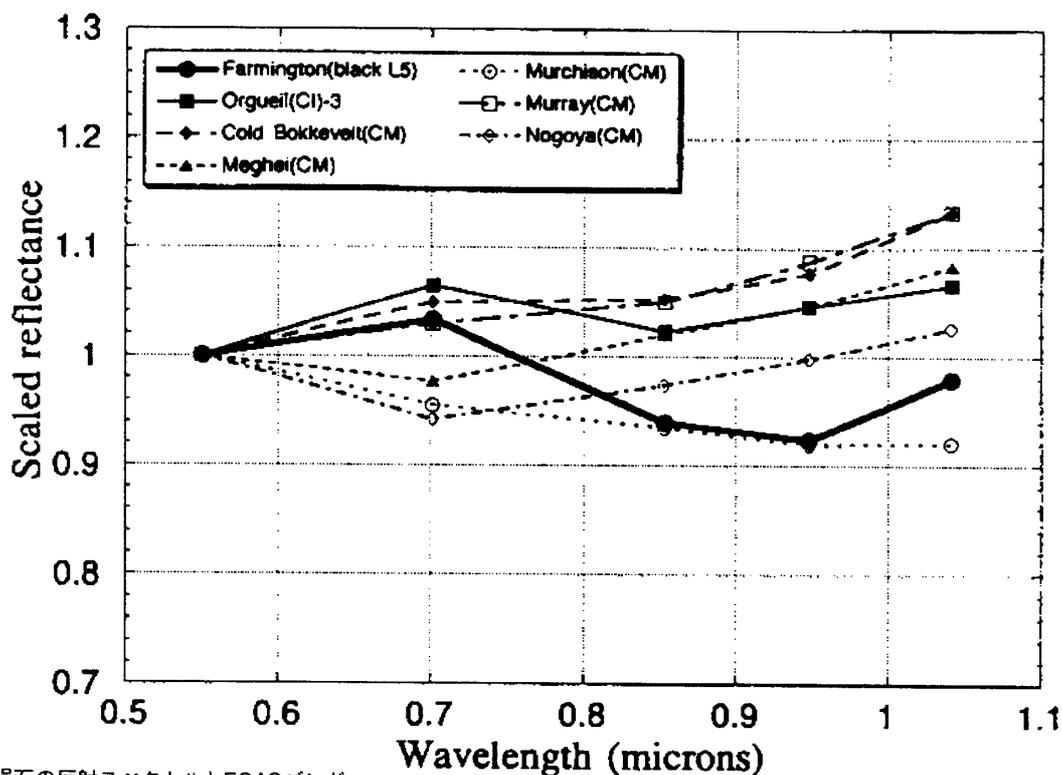


図3. 代表的隕石の反射スペクトルとECASバンド

例である[6]. この例では、位相角90度付近まで偏光量が観測されているが(曲線は粗い表面と波長と同程度の粒子によるモデル計算である)、普通の小惑星についての地上観測では、位相角が60~70度を越すことは稀である。偏光量の観測が、90度よりずっと大きな位相角の所まで行けることが、探査機による“その場”観測の絶対的な強みである。大きな位相角まで観測することで、偏光量のピークでの位相角と偏光度、および更に大きな位相角領域での偏光度減少の傾きが分る。これによって、物質の光学パラメータや粒度分布をより明確に限定することが可能になる。我々のカメラでは、カメラCCDの前面ガラスの端に、偏光角が45度おきにセットされたガラス偏光子の薄片を4枚貼り付けて、直線偏光度と偏光角を測定する計画である。

4.3 遠距離接近フェーズでの長時間変光曲線の観測

小惑星の自転周期とその形状は、変光曲線から決められる。地上観測の場合、昼夜の交替のために、変光曲線は必然的に1晩で途切れる。また、小惑星の運動に伴って測光の基準となる星は順次変

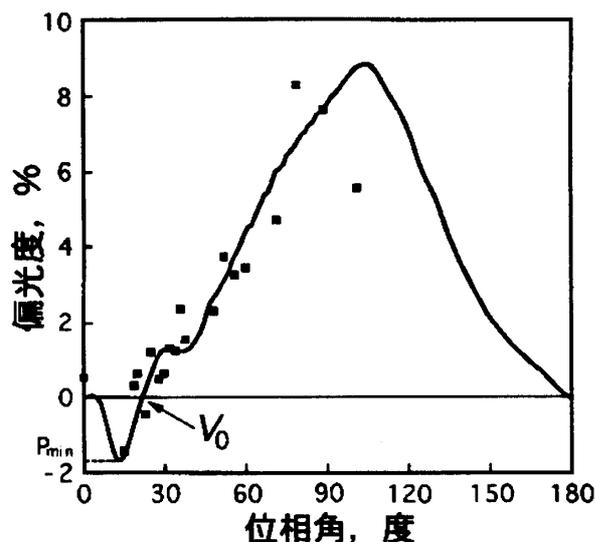


図4. 小惑星トータティスの位相角・偏光度関係とモデル曲線 ([6]を改変)

わるので、複数の観測所で協同観測したデータを合わせても、1晩より長い自転周期の決定精度が悪くなるのは避け難い。特に、微小小惑星では稀ではないと予想される非主軸回転の検出には、長時間の連続した変光曲線は必須であるが、地上観測でこれを得るのは不可能である。

MUSES-Cは、距離約10万kmから1000km程度まで数週間かけてネレウスに接近していく。10万kmでは、ネレウスの明るさは既に2-3等なので、カメラで測光するのは容易である。この期間、10-15分おきに連続した観測を行ない、長時間連続した変光曲線を取得する。これを周期解析することによって、非主軸回転の周期と振幅を見つきたい。この遠距離接近期間は、地上観測を“その場”の観測に結び付ける重要な中間領域と位置づけられる。この期間に、地上観測による自転やカラー観測の結果をチェックし、食い違いが発見されれば、ネレウス探査のランデブー運用計画にまだ反映させられるからである。

5. 可視カメラの仕様

このカメラは、航法工学側との共用なので、まだ仕様は確定していない。ここでは、理学観測が想定している仕様を紹介しておく。

○ カメラ(屈折型, 250g)

レンズ口径: 25-40mm ϕ

焦点距離(固定): 130-150mm

視野: 5-6度平方

CCD: 1000×1000ピクセル(13×13mm)程度

分解能: 20 arcsec/pix (高度 10kmで 1m/pix)

量子効率: ~85% (@ 500nm)

A/D変換: 12 bits

光学系の波長透過特性: 430-1050nm

限界等級: 5 mag(V-band, 1秒露出)

- フィルターホイール装置 (250g)
1円板, 8穴, 回転速度: 2.5 deg/sec
- 偏光子(4方位角)
金属銀をガラス板の中に封入延伸させた板状タイプ
波長透過特性: 740nm以上の長波長を透過
消光比: 10000:1以上

通常のCCDは、暗電流を下げるために、周囲の環境温度から-50~-100度程度冷却して使用するのが普通である。我々のカメラは、重量と熱の問題から十分な冷却ができず、測光較正用の恒星を観測できないのが最大の悩みだった。最近、MPP型(Multi-Pinned Phase)のCCDを採用するメドが立ったので、この場合冷却する必要がなくなった。MPP型CCDの画期的な特徴は、従来型CCDに比べて暗電流が2桁小さく(あるメーカーの製品では、20℃で、従来型が10,000 e/sであるのに対してMPPでは70 e/s)、温度依存性も非常に小さいことである。宇宙環境で受ける放射線による暗電流の発生も小さい。ピクセルに貯めうる光電子の量が30%程度従来型より低下するが、これは露光時間の調整で対応できる範囲である。

このカメラを中心波長0.55 μm (FWHM=0.06 μm)、量子効率0.5、光学系の透過率0.5と仮定すると、V=5等の星から星像内に約5,000 e/sの光電子が得られる。100秒間積分すると、暗電流によるノイズはほぼ100(7000の平方根)であるので、10等星でもS/N=数10で測定できる計算になる。つまり、ECASの標準星が、機上で直接観測できる訳である。8-10等の星が撮影できるならば、これらを探査機の姿勢や位置の決定に利用することも可能だろう。

偏光子については、MUSES-Cが飛行中に受ける太陽フレアの強度を模した陽子線を加速器で照射し、透過率などの変化がないことを確かめた。

6. 測光学的較正

先に述べた理学観測項目を精度良く達成するためには、カメラ系の測光学的較正が極めて大切である。これが満足にできなければ、小惑星表面の微妙なカラー変化などは捉えられないだろう。ここでは、測光学的較正を、絶対較正と相対較正とに分けて説明する。

6.1 絶対較正

ここで言う絶対較正とは、CCDに光が当たった時のピクセルからの出力(カウント値, DN値)と、光のフラックス(erg/sec/cm²)との関係を決定することである。地上観測では、小惑星は点像にしか見えない。このために、小惑星の反射光量が測定されても、断面積による効果とアルベドの効果を分離することができない。これに対して探査機による“その場”の観測では、視野の実面積は分かるから(disk-resolved)、DN値がフラックスに直せれば、太陽からのフラックスとの比を作ることで表面アルベドが求められる。また、バンド毎に、小惑星表面のアルベドマップを作ることもできる。DN値をフラックスに直す正統的な方法は、標準測光システムを利用することである。“測光システム”とは、このシステムを作った人の測光装置と、いくつかのフィルターバンドで定義した適当な数の標準星の明るさ(等級)である。MUSES-Cでは、我々は上に述べたECAS測光システムに準拠した測光を行なう。このシステムが定義するのと同じフィルターや受光器を使うのは不可能なので、具体的には、似たようなフィルターを作り、ECAS標準星を観測して、標準システムと我々のシステムとの等級の変換係数を決めるのである。この係数を用いれば、ネレウスからの光をフラックスに直すことが可能になる。CCDカメラは面の受光器なので、絶対較

正の実現は、次に述べる相対較正ができることが前提となる。

6.2 相対較正

CCDカメラで一様照度の面光源を撮影しても、CCD各ピクセルからのDN出力は普通は一定にはならない。それは、レンズの周縁減光とムラ、フィルターのムラ、CCDピクセルの感度ムラ、光子の統計的ゆらぎ等があるからである。さらにこれらは宇宙環境下で10%程度変化した事が、ガリレオやPHOBOS-2で報告されている。このため、なるべくネレウスに達した後でこれらムラの較正: Flat-fielding (FF)をすべきである。この較正が不十分だと、ネレウスの撮像の際にウソの表面カラーを検出する不都合が起りうる。FFの方法として、星像をCCD上で流したり、面光源の天体を撮影することが考えられるが、時間効率やカメラ感度の点でCCD全面の較正は難しそうである。対物レンズのごく近くに太陽光の反射板を置いて撮影すれば、ほぼ完全ピンボケになるので、一様照度の面光源としての役割をする(図5)。FF補正は全ての測光観測に適用するので、FFのためのデータは十分な数

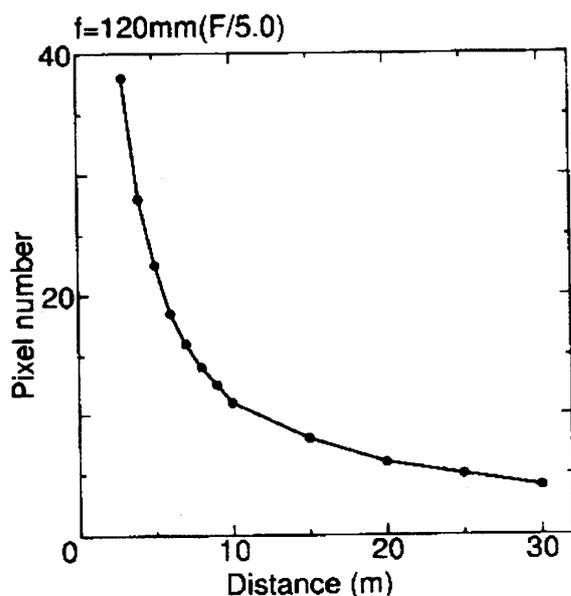


図5. 可視カメラの距離とボケ(ピクセル数)の関係

を取得して、出来る限り誤差を小さくする必要がある。カメラがジンバルに乗ることになれば、脇に取り付けた太陽反射板に任意の時にカメラを向けてFF補正をすることが可能となる。しかしながら、カメラが固定となる場合には、探査の撮像が全部終了した直後に、カメラの前に反射板を挿入するような簡単な機構を工夫する必要があるだろう。

謝辞

この原稿作成に際しては下記の可視カメラチームのメンバーからの協力を受けた。(順不同) 中村昭子(宇宙研), 斎藤潤(西松建設), 秋山演亮(西松建設), 小笠原雅弘(日本電気), 出村裕英(東大・地物), 佐々木晶(東大・地質), 布施哲治(国立天文台), 古宇田亮一(地質調査所), 向井正(神戸大), 岡本創(東大・気候システム研究センタ), 石元裕史(神戸大)

参考文献

- [1] Chapman, C. R. et al., 1996: *Icarus* **120**, 231-245.
- [2] 中村昭子ほか, 1994: 第15回太陽系科学シンポジウム集録, 68-71.
- [3] Ishimoto, H., 1996: *Icarus* **122**, 153-165.
- [4] 中村士, 1996: 第18回太陽系科学シンポジウム収録, 38-41.
- [5] Tedesco, E. F. et al. 1982: *Astron. J.* **87**, 1585-1592.
- [6] Mukai, T. et al. 1994: *Planets Space Sci.* **42**, 323-326.