

星の王子さまのふるさとを想う

安部正真，大場庸平，石黒正晃，長谷川直，

〈宇宙科学研究所 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: abe@planeta.sci.isas.ac.jp

布施哲治

〈国立天文台ハワイ観測所 650 North Aohoku Place, Hilo, HI96720, U.S.A.〉

e-mail: tetsu@subaru.naoj.org

星の王子さまのふるさとでもある、直径数百メートルの非常に小さな小惑星の観測がすばる望遠鏡を用いて行われました。その名前は 1998SF36。まもなく打ち上げられる小惑星サンプルリターン計画 (MUSES-C) の探査対象です。ここでは、すばる望遠鏡を用いて得られた小惑星 1998SF36 の観測結果を紹介し、星の王子さまのふるさとについて想いをめぐらしてみたいと思います。

1. MUSES-C 計画

「星の王子さまに会いに行きませんか」というキャッチフレーズで集めた約 88 万人の名前を載せた探査機がまもなく打ち上げられます。「星の王子さま」というのはサン＝テグジュペリ作の童話です。このお話のなかで主人公は星の王子さまと出会います。星の王子さまのふるさはとても小さな小惑星です。太陽系には、火星や木星のような惑星以外に、望遠鏡を使わないと見るできないような小さな天体が数多くあります。太陽系にある小さな天体のうち、惑星の周りをまわる衛星、尾っぽをもって見える彗星とは別の天体を小惑星と呼んでいます。その小惑星のひとつに探査機を送り込んで、表面を調べた後、表面のかけらを地球に持ち帰ろうという計画があります。その計画は MUSES-C と呼ばれ、正式には 1996 年からスタートしました。当初探査対象としていた天体は大きさが数百メートル

程度の小さな小惑星で、名前は 1989ML とよばれていました。MUSES-C は 2002 年の夏に宇宙科学研究所の M-V ロケットで打ち上げられる予定でした。

しかし、2000 年以降の M-V ロケットの打ち上げスケジュールに変更が生じたのです。そのため、1989ML から別の小惑星に探査対象を変えることになりました。新しい天体の名前は 1998SF36 というものです。1989ML とか 1998SF36 とかいう小惑星の名前は、仮符号と呼ばれるもので、発見されたときにつけられる名前です。最初の 4 桁の数字が発見された年号を表します。つまり、1989ML は 1989 年に発見された小惑星、1998SF36 は 1998 年に発見された小惑星だということです。新しい探査対象の 1998SF36 は、発見されて間もないため、その軌道がある程度求められている以外は何も分かっていませんでした。実際に探査機を送り込むためには、その天体の大きさや形や表面の状態を知っておく必要があります。

2. 小惑星の素顔を知るために

宇宙科学研究所では海外の研究者にこの小惑星の観測の実施を呼びかけるとともに、国立天文台にすばる望遠鏡を用いた1998SF36の観測の協力を依頼しました。ハワイ観測所長および各観測装置グループの協力のもと、可視の波長域はFOCAS、近赤外域はIRCS、中間赤外域はCOMICSの装置を使う観測が計画されました。可視域と近赤外域の観測からは小惑星のスペクトルタイプが、中間赤外域と近赤外域の観測からは小惑星の大きさがわかります。

スペクトルタイプというのは、これまで行われた数多くの小惑星の地上観測から分類された、小惑星の色の区分のことです。SタイプとかCタイプとかMタイプとかが主ですが、細かく分類すると10種類以上あります。スペクトルタイプがわかるとおおよその表面物質が推定できます。これは、地球に落下する隕石や地球上の岩石を調べて、それらの種類と小惑星のスペクトルタイプを関連付ける研究がされているからです¹⁾。

小惑星の大きさについては、可視の波長域でみた明るさからある程度推定できますが、正確ではありません。小惑星は他の惑星と同様に自分自身では光っておらず、太陽の光を反射して見えています。実は同じ明るさで見えていても、反射率が高くて大きさが小さい場合と、大きさは大きくても反射率が低い場合があります、その区別は反射した光の明るさを見ていだけではできないのです。両者の違いは、表面の温度の違いで現れます。反射率が高いと太陽の光を天体に取り込まないので温度は低く、反射率が低いと逆に太陽の光を天体に取り込むため暖まり温度が高くなります。温度の高い低いとは天体からの熱輻射を調べることで分かります。熱輻射は近赤外域から中間

赤外域の波長で観測することで調べることができるのです。

小惑星の形については、小惑星を長時間連続して観測してその明るさの変化から調べます。小さな小惑星は一般的にはいびつな形をしています。小惑星も地球や他の惑星のように自転しています。小惑星をある方向から観察し続けると、自転にともなってシルエットの形や大きさが変化します。それが小惑星の明るさの変化となって観察されます。明るさの変化の周期は自転の周期について、明るさの変化の幅は形についての情報を私たちに教えてくれます。

明るさの変化の観測は、日本国内では東京大学木曾観測所のシュミット望遠鏡、三鷹の教育用望遠鏡、美星のスペースガード望遠鏡など、海外でも数多くの観測所で実施されました。その結果自転周期が12時間程度であること、形は非常にいびつで長軸と短軸の比が2以上もある細長い形であることがわかっています^{2), 3)}。また自転軸の向きについての情報も明らかになり、探査機が小惑星の近くに到着した際の小惑星の見え方や、小惑星の表面に接地する際の接近の仕方を考える上で重要な情報が得られました。

3. すばるを用いた観測

すばるを用いた観測に話を戻したいと思います。MUSES-C計画の目的は、小惑星から表面のかけらを地球に持ち帰ることです。これは世界ではじめての試みです。これまで小惑星の研究は、地上の望遠鏡による観測と、隕石の研究を中心として進められてきました。しかし、隕石は地球に落下する前の観測データを持っていませんし、望遠鏡で観測できる小惑星は地球に落下してきません。ところが、MUSES-Cの探査対象の小惑星は将来表面のかけらを隕石と同じように調べることができる

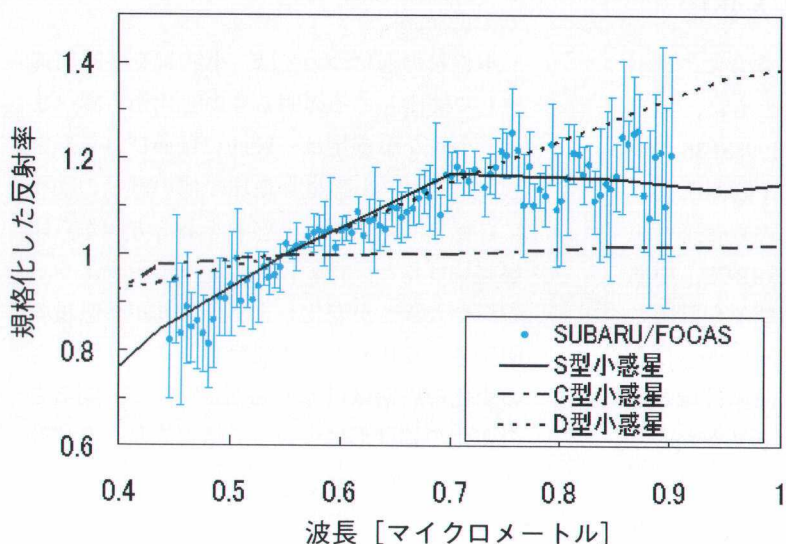


図1：FOCASを用いて得られた1998SF36の反射スペクトル（青）。横軸は波長（マイクロメートル）、縦軸は0.55マイクロメートルを1とした相対反射率。小惑星で主なスペクトルタイプ（Sタイプ：実線、Cタイプ：1点鎖線、Dタイプ：破線）の平均的な反射スペクトル⁴⁾を合わせてプロットした。1998SF36の反射スペクトルは可視の波長域でSタイプとよく似ていることが分かる。

天体なので、望遠鏡を用いて調べておけば、望遠鏡による観測と地上での分析の両方ができる初めてのチャンスとなります。

1998SF36は2000年12月末に20等級まで明るくなりました。この明るさまで明るくなると、すばるのような大望遠鏡を用いれば、FOCASのような装置で可視の波長域の分光が可能になります。分光とは天体の色の違いを詳しく調べることです。我々は2000年の12月31日に、FOCASを用いて1998SF36の分光を実施しました。図1は、FOCASで得られた1998SF36のスペクトルと主なスペクトルタイプの小惑星のスペクトルを比較したものです。この図から、1998SF36のスペクトルはSタイプの小惑星のスペクトルに一番よく似ていることがわかります。1998SF36の分光観測は、その後海外のいくつかのグループに

よっても実施されましたが、みな同様な結果を得ています。そのなかでもFOCASでの観測は最も早く実施され、いち早くスペクトルタイプを推定したことで大きな評価を受けています。

1998SF36は、2001年になるとさらに観測条件が良くなり、3月末には地球から0.04天文単位の距離（月までの距離の約15倍）まで近づきました。我々はIRCSを用いて、3月10日と11日にJ、H、K、L、Mバンドの測光とLバンドの分光を行いました。測光というのは、ある波長で見たときの天体の明るさを正確に測ること

です。JとかKとかいうのは波長の長さに対応する呼び名です。J、H、Kバンドは太陽の光の反射を見えますが、Mバンドになると小惑星の熱輻射を見ることになります。Mバンドよりさらに長い波長にNバンドというのがあり、そこはCOMICSを用いて観測する予定でしたが、すばる望遠鏡の副鏡の調子が悪く観測はできませんでした。

図2は、IRCSを用いて得られた1998SF36のJ、H、Kバンドの測光の結果を主なスペクトルタイプの小惑星の同様なデータと一緒にあらわしたものです。これをみると、やはりこの小惑星はSタイプの小惑星とJ、H、Kバンドの測光でも似ていることがわかります。

Nバンドの観測はCOMICSを用いて実施することはできませんでしたが、IRCSの観測とはほぼ同時期の3月14日に、ESOの3.6mの望

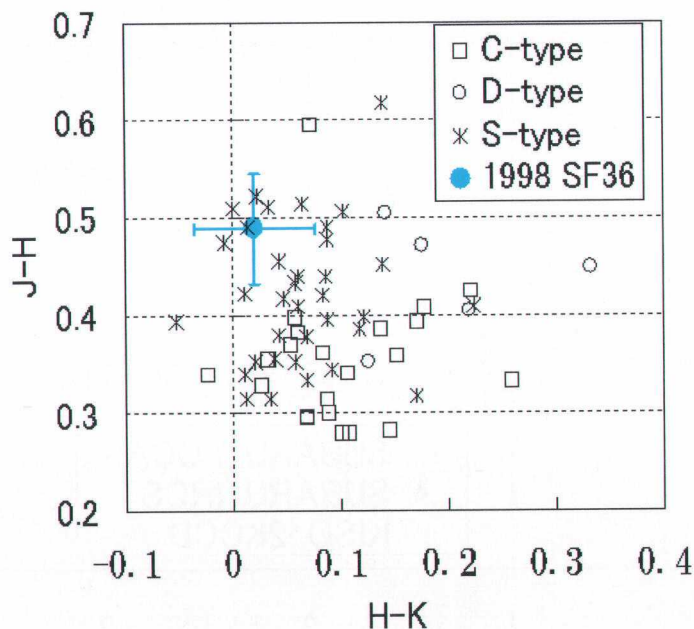


図2：IRCS で得られた，1998SF36 のJ, H, K バンド測光の結果（青）。横軸はHバンド等級とKバンド等級の差，縦軸はJバンド等級とHバンド等級の差。太陽光の色は差し引いていない。小惑星で主なスペクトルタイプ（Sタイプ：×，Cタイプ：□，Dタイプ：○）について同様なデータ⁵⁾のあるものをプロットした。1998SF36の反射スペクトルは近赤外域の測光値でもSタイプとよく似ていることが分かる。

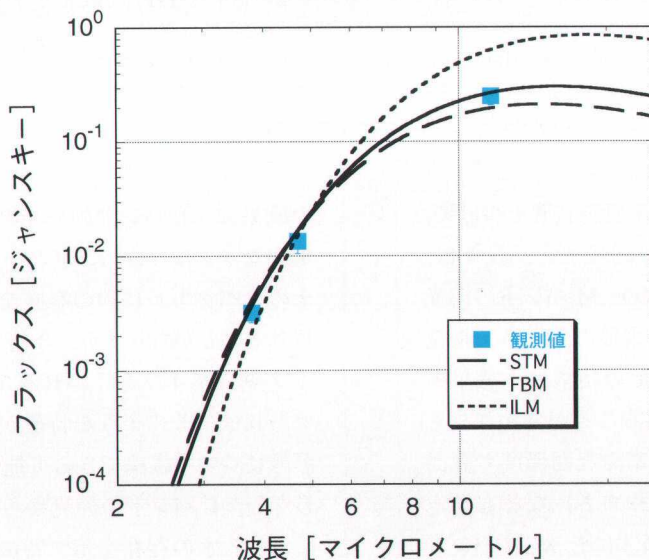


図3：IRCS で得られた 1998SF36 のL, M バンドの測光の結果（青■）。横軸は波長（マイクロメートル），縦軸は小惑星からの熱輻射フラックス（ジャンスキー）。ESO3.6m 望遠鏡のTIMMI2で得られたNバンドの測光値⁶⁾も同時にプロットしてある（青■）。3種類の曲線は観測された熱輻射フラックスを最もよく説明できる熱モデルによる計算結果（点線は等温熱モデル，破線は標準簡易熱モデル，実線は表面の熱のしみこみやすさの違いも考慮した一歩進んだ熱モデル）。1998SF36の熱輻射は実線の熱モデルでよく説明できることがわかる。この熱モデル計算結果から，小惑星の大きさや表面反射率を求めることができた。

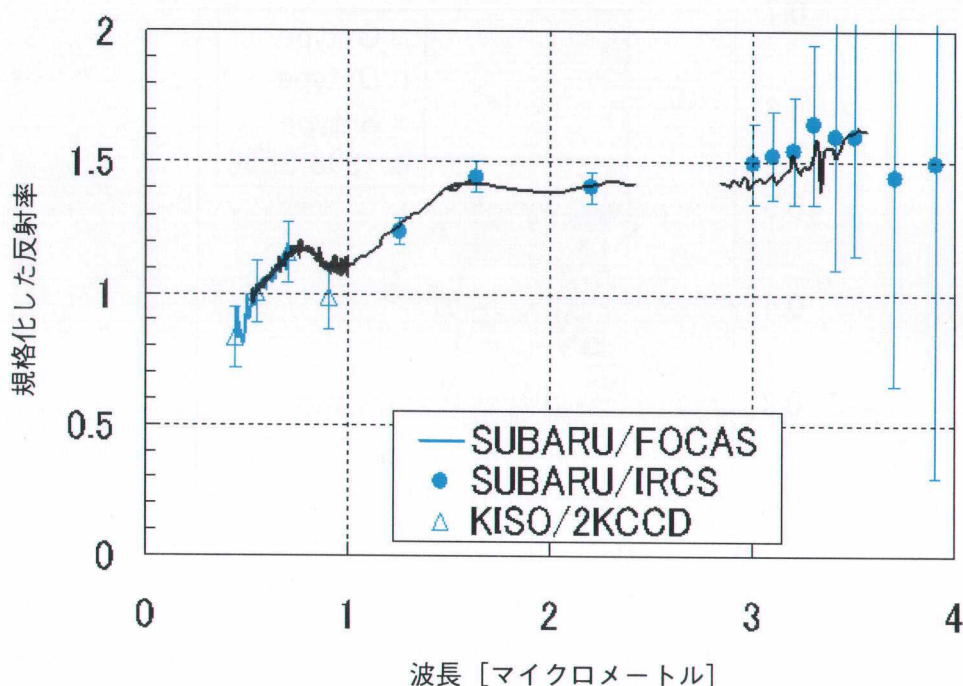


図4：IRCSで得られた1998SF36のLバンド分光の結果（青●）。横軸は波長（マイクロメートル）、縦軸は0.55マイクロメートルを1とした相対反射率。FOCASで得られた分光の結果（青線）、IRCSで得られたJ,H,Kバンドの測光の結果（青●）、木曾観測所での観測で得られた可視域の測光の結果²⁾（青△）も合わせてプロットした。さらにSタイプ小惑星である532 Herculinaの反射スペクトルも合わせてプロットした^{7), 8), 9)}（黒線）。1998SF36の反射スペクトルは532 Herculinaと非常に良く似ていることがわかる。Lバンドの分光の結果からは、小惑星表面における水の存在を示す特徴がないことがわかった。

遠鏡にTIMMI2と呼ばれる観測装置をつけて、Nバンドの測光が実施されました⁶⁾。我々は、この観測データとIRCSのL,Mバンドの測光のデータを合わせて、小惑星の大きさを推定することができました。その結果、小惑星の平均直径は約300mであることが分かりました。また、小惑星の反射率や表面温度や表面の熱特性（熱のしみこみやすさ）なども推定することができました。図3にL,M,Nバンドの測光結果と熱輻射モデルの計算結果を比較して載せました。L,Mバンドの観測はすばるのような大望遠鏡を用いないとできない観測でした。

すばるを用いた観測で得られたもうひとつ

の成果に、Lバンドの分光があります。小惑星のなかには、Lバンドの分光を実施すると、そのスペクトルに水の存在を示唆する特徴が現れることがあります。今回1998SF36がCタイプやDタイプと呼ばれるスペクトルタイプであれば、そのような特徴が現れ、水の存在形態について議論できる可能性がありました。しかし、Lバンドの分光からは、小惑星表面における水の存在を示す特徴は見つかりませんでした。Sタイプの小惑星のLバンドの観測数はそれほど多くないため、今回の観測結果は、Sタイプの小惑星の表面には水の顕著な存在がないことを再確認した、という点では大きな意味がありました。図4にLバンド

の分光の結果と一緒に、FOCASの分光、IRCSのJ, H, Kバンド測光、木曽観測所での可視域の測光の結果をあわせたグラフを示します。

4. 星の王子さまのふるさとを想う

以上、小惑星 1998SF36 について、可視域から中間赤外域の測光および分光観測が実施されたことを報告しました。今回紹介した観測のほかにもレーダ観測¹⁰⁾などが実施されており、これだけ短期間で集中的に多くの種類の観測が実施されたのは、この小惑星が探査対象天体であることと、観測条件が非常に良かったことが挙げられます。まもなく打ち上げられる探査機は、2005年に小惑星に到着します。小惑星の近くから、可視域や近赤外域の測光分光装置および蛍光X線の観測装置などでその場観測されるだけでなく、表面のかけらを採取し、2006年には地球に持ち帰る予定です。

MUSES-Cの探査対象は直径が300m程度の小さな小惑星です。星の王子さまのふるさと

もちょうどそのくらいの大きさではないと思います。今回の観測で得られた成果で、我々は星の王子さまのふるさとがどうなのかについて想いをめぐらしています。普通の地上観測では想いをめぐらすだけで終わってしまいますが、1998SF36については、探査機が近くまで行って調べることができるため、我々の予測が正しかったのかの答えあわせができる楽しみがあります。また、表面のかけらが無事持ち帰られれば、持ち帰られた物質の詳細な分析をすることで、小惑星についてさらなる詳しい情報が得られると期待しています。

謝辞

今回の観測につきましては、国立天文台の安藤裕康前ハワイ観所長、臼田知史さんをはじめとするハワイ観測所のみなさん、柏川伸成さん、青木賢太郎さん、大山陽一さん、ほかFOCASチームの皆様、小林尚人さん、後藤美和さん、寺田 宏さん、Alan T. Tokunaga さん、ほかIRCSチームのみなさん、COMICSチームのみなさん、ほか大勢の方にご協力いただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Gaffey M. J., Burbine T.H., Binzel R.P., 1993, *Meteoritics* 28, 161
- 2) Abe M., et al., 2002, LPSC 2002, #1666
- 3) Kaasalainen M., et al., 2002, ACM 2002, 18-11
- 4) Zellner B., Tholen D.J., Tedesco E.F., 1985, *ICARUS* 61, 355
- 5) Sykes M. V., et al., 2000, *ICARUS* 146, 161
- 6) Sekiguchi T., et al., 2001, *IAUC* 7598
- 7) Bus S. J., Binzel R.P., 2002, *ICARUS* 158, 106
- 8) Bell J. F., et al., 1988, LPSC XIX, 57
- 9) Jones T. D., et al., 1990, *ICARUS* 88, 172
- 10) Ostro S. J., et al., 2001, *DPS* 2001, 41.13

Expectation of 「Le Petit Prince」's Home
Masanao ABE, Yohei OHBA,
Masateru ISHIGURO, Sunao HASEGAWA
Institute of Space and Astronautical Science
Tetsuharu FUSE
National Astronomical Observatory of Japan

Abstract: We observed a few hundred meter-sized asteroid like "Le Petit Prince"'s home using Subaru telescope. The name of the asteroid is 1998 SF36, which is a target object of the Japanese asteroid sample return mission, MUSES-C. We report the results of the observations and expect the true picture of the tiny-sized asteroid.