

Suprime-Camが見せてくれた 太陽系の進化

吉田 二美

〈千葉工業大学惑星探査研究センター
〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1〉
e-mail: fumi.yoshida.ermei@gmail.com



吉田



寺居

寺居 剛

〈自然科学研究機構国立天文台・ハワイ観測所 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI 96720, USA〉
e-mail: tsuyoshi.terai@nao.ac.jp

すばる望遠鏡の集光力と広い視野をもつSuprime-Cam（シュプリームカム）は、太陽系内の小天体（小惑星、彗星、衛星、太陽系外縁天体など）を探索するには最高の組み合わせである。かつてない深さで太陽系小天体サーベイを実行できるため、観測結果すべてが世界で初めて得られたデータだった。筆者らはファーストライトの頃からSuprime-Camの画像データを使って太陽系小天体の研究を続けてきた。そしてSuprime-Cam最後の夜にもデータを取らせていただき、かれこれ17年にわたりお世話になった。ここではSuprime-Camへの感謝の気持ちを込めて、Suprime-Camとともに歩んだわれわれの研究を振り返ってみる。

1. 微小メインベルト小惑星の世界

1.1 Suprime-Cam 始動

20世紀がほぼ終わろうとしていた頃Suprime-Camがファーストライトを迎えた。この時吉田は博士課程の学生で、Suprime-Camの画像から小惑星を探し、これまでの中小口径の望遠鏡のサーベイでは発見できなかったsub-kmサイズの小惑星のサイズ頻度分布（Size Frequency Distribution; 以下SFD）を決めるとい博士論文のお題を指導教官の中村士先生からいただいたところだった。太陽系にはkmサイズで約100万個、もっと小さいサイズまで含めると無数とも言える小天体がいくつかのグループに分かれて分布している。

SFDはどのくらいのサイズの天体が何個存在するかの統計である。SFDは各小天体グループ固有の形成環境を反映し、その後のグループ内の衝突進化によって徐々に変化していくため、各小天体グループの進化を読み解く鍵となる重要な情報が反映されている。当時はkmサイズの小惑星のSFDは、McDonald survey, Palomar-Leiden survey (P-Lサーベイ), Spacewatch Surveys, Sloan Digital Sky Survey (SDSS)などで調べられていた。しかし、小天体グループ内で生成された衝突破片である可能性の高い微小(sub-kmサイズ)な小惑星のSFDは直接測定されたことはなかった。1990年代、メインベルト^{*1}にあるsub-kmサイズの天体を検出できる観測装置は存在しなかった。Sub-km

^{*1} 火星と木星軌道の間的小惑星が多く分布しているベルト状の領域。

のメインベルト小惑星 (Main Belt Asteroids; MBA) の SFD の研究は、口径 8.2 m のすばる望遠鏡の集光力と広い視野をもつ Suprime-Cam のおかげでようやく可能となったのである。

1.2 Sub-km MBA を捉えた!

Suprime-Cam の CCD がまだ 10 枚そろってなかった頃、このカメラの開発責任者だった東京大学の岡村定矩先生 (当時) のご好意で、試験的に黄道面の近くの空を 2 枚連続撮影していただいた。このデータを用いてどうやって移動天体を探すのか? 天文データ解析初心者の私は画像処理ソフト IRAF のマニュアルを片手に試行錯誤した。

小惑星の発見と命名で日本のアマチュア天文家が大いに活躍した時代があったので、移動天体の探し方は経験者に聞くことができた。「同じ星野を異なる時刻に撮影した 2 枚の写真をブリンク*²させる」のだ。しかし Suprime-Cam の画像をブリンクしても目はチカチカし、頭はクラクラするばかりで容易に移動天体は見つからない。そもそも Suprime-Cam の画像の端から順番に拡大表示して、位置を合わせ、ブリンクさせ、移動天体を探し、次の領域に少しシフトさせて、拡大表示、位置合わせ、ブリンク、天体探し、,, , を繰り返す作業はたいへん苦痛である。何年やっても作業が終わらない気がした。どうしたものかと考えていたとき、突然ひらめいた。「そうだ、2 枚の画像を差し引けばいいのだ!」同じ星野では時間をあけて撮影しても恒星は動かないので、1 枚目から 2 枚目の画像を引けば、プラスとマイナスが相殺して恒星は消えてしまうはず*³。一方、移動天体は 1 枚目と 2 枚目では位置が異なるのでゼロにならない。1 枚目から 2 枚目を引いた差し引き画像では移動天体は 1 枚目がプラスなので白く、2 枚目はマイナスなので黒く見えるはずである。したがっ

て白点と黒点のペアを見つければそれが移動天体である。これを思いついてから、吉田は移動天体を探すのが楽しくなった。白黒、白黒,,, いっぱいいいるじゃん!

この試験観測のデータに $V=19-24$ 等の 27 個の移動天体が見つかった。この明るさを小惑星の平均的な反射率を仮定して直径に換算すると約 0.6-6 km となる。やった! Sub-km の小惑星が検出できている!

小惑星の SFD は一般にべき級数で近似され*⁴、べき指数の値で評価される。この試験観測で得られた MBA の SFD のべき指数 (b) は約 1.0 だった。それまで MBA の総数は 1960 年代に行われた P-L サーベイで検出された km サイズの小惑星のべき指数 (b=1.75) に基づいて見積もられていたが、この試験観測から、微小 MBAs は従来の見積もりよりもかなり小さなべき指数の SFD をもち、それらの総数はこれまでの予想に比べて大幅に少ないことが示された¹⁾。例えば、直径 3 km より大きい小惑星が 3 個あったとする。P-L サーベイのべき指数を使って予想すると、直径 0.3-3 km の小惑星の数は 100 個以上となる。しかしこの試験観測で得られた結果ではこの範囲の小惑星は約 30 個となる。

地球近傍の小惑星は近地球小惑星 (Near-Earth Asteroids; NEA) と呼ばれるが、これらの天体は大きいもので直径 10 km 程度で、小さい天体が圧倒的に多いため発見が難しい。現在約 17,000 個の NEA が発見されているが、地球に衝突すると局所的な被害をもたらす可能性のある直径 0.14 km 以上の NEA のリスト作りのための観測が NASA 主導で現在も進められている。NEA の多くは小さい MBA が選択的に軌道進化したものと考えられている。太陽や惑星に衝突するか、太陽系から

*² 画像を交互に素早く入れ替えて表示させると、移動天体は点滅して見える。

*³ 実際には 1 枚目と 2 枚目の画像では観測条件によってシーイングサイズや恒星のフラックスが微妙に違い、単純に引いても綺麗には消えないが、おおむね消える。

*⁴ 直径 D km 以上の小惑星の数を N とすると $N(>D) \propto D^{-b}$ で近似される。

放出される運命にあるため、NEAの数は数百万年という短い時間で半減する。しかし太陽系形成から46億年を経た今でもNEAが存在するという事は、これらが常にどこからか供給されていることを意味する。現時点の知見ではその主供給源はメインベルトである。

上述の試験観測で微小MBAの数は予想より少ないことがわかったので、地球軌道付近へ軌道進化する小惑星もこれまでの見積もりより少ないはずであり、よって地球との衝突が危惧される天体数も従来の予想より少ない。この文脈で日本天文学会2002年春季年会に発表を申し込んだところ記者会見をすることになった*5。「地球接近小惑星のふるさとを調べる—すばる望遠鏡広視野カメラによる微小メインベルト小惑星の探索—」というタイトルで記者会見し、複数の新聞に掲載していただいた。

1.3 Sub-km MBAのSFD

2000年にSuprime-Camの共同利用が始まった。吉田の博士論文はもっと多くのメインベルト小惑星を検出してSFDを求める予定だったので、すばる望遠鏡の観測時間を確保しなければならなかった。ところが中村先生と吉田のプロポーザルは落ちてしまった。一方で2夜の観測時間を確保できたのは国立天文台の渡部潤一さんのグループだった。彼らの目的は太陽系外縁天体を探すことだった*6。MBAの検出には太陽系外縁天体ほど長い露出時間は不必要だったが、太陽系外縁天体検出目的で撮られたデータにもMBAは必ず写る。渡

部さんにMBAの研究のために彼らのデータを提供してもらえるように中村先生が依頼し、吉田の博士論文用のデータは何とか確保できることになり、たいへんありがたかった。

こうして試験観測の約17倍のサーベイ領域のデータを確保したので、少なくとも17倍の検出数は見込まれる。早速差し引き画像を使って白黒白黒と並んで見える点を探し、印をつけていく。55分間隔で3回撮像した画像と、11枚連続撮像した画像を使っての検出だったので、試験観測のデータより明確に移動天体と恒星を区別することができた(図1参照)。この検出方法の詳細は天文月報の記事¹³⁾で詳細に述べた。中村先生と吉田は差し引き画像を使った移動天体検出法を「ネガポジ法」などと呼んでいたが、デジタルカメラが主流になった現在では時代遅れの呼び方になってしまった。

このデータセットから861個のMBAを検出し、直径0.5-1 kmの範囲のSFDを求めると、sub-kmサイズのMBAのSFDのべき指数 b は1.2だった。試験観測のデータで得られた結果と同様に、P-Lサーベイの値(1.75)よりずっと小さく、この観測をもって、sub-km MBAの数は大きな小惑星のSFDから推定される数よりずっと少ないことが確定した。メインベルト全体をとおしてsub-kmサイズの天体を直接検出し、それらのSFDを導出したのはわれわれが初めてだった。かくして吉田は無事に博士論文を提出できたのである¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。

なお、「ネガポジ法」では暗い移動天体でも的

*5 当時は学会が記者会見する発表を選出していた。

*6 渡部潤一さんのグループはこの後も太陽系外縁天体サーベイを続けていたが、まとまった数の太陽系外縁天体を検出することはSuprime-Camほどの視野をもってしても、共同利用の限られた夜数の中では難しかった。しかし、検出方法に工夫をして $R=26.0$ 等級までの太陽系外縁天体の検出に成功している²⁾。一方で、ハワイ大学の観測時間を使えるグループは、すばるの共同利用やハワイ時間、さらにはSuprime-Camのアーカイブデータも使って太陽系外縁天体のサーベイを精力的に進めていき³⁾⁻⁹⁾、太陽系外縁天体サーベイは彼らの独壇場となる。2014年になってSuprime-Camの後継機のHyper Suprime-Cam (HSC)で、寺居¹⁰⁾や台湾のChenら^{11),12)}が太陽系外縁天体検出に乗り出し、2016年からは吉田らがカルフォルニア工科大学のMike Brown教授と協力して第9惑星探しを始めた。今後はすばる戦略枠HSCサーベイのデータを共有できる日本や台湾の研究者がアジアから太陽系外縁部の研究を発信できる時代になると期待できる。

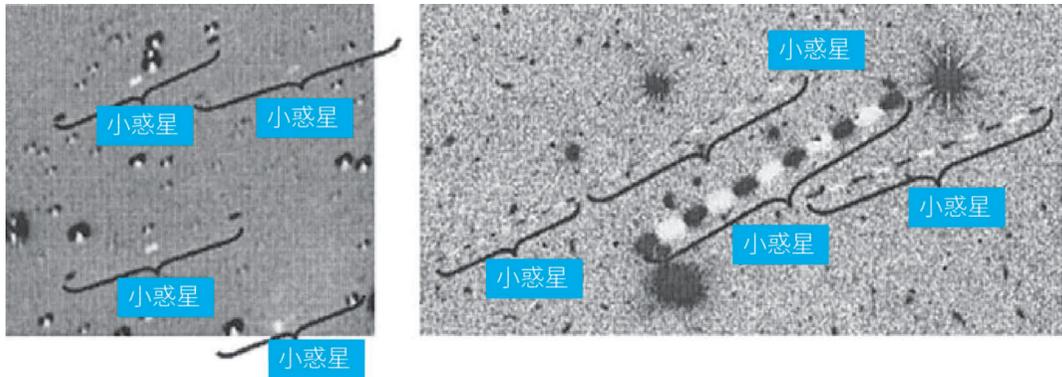


図1 左は3枚、右は11枚の画像を差し引きして作った合成画像. 移動天体と背景の恒星を明確に区別可能.

確に見つけることができるが、人力でやるのでより大量のデータを扱う際は時間・労力ともかなりの負担を強いられる。人は疲れてしまう生き物である。そのようなときはソフトウェアによる自動検出が必須であり、共著者の寺居はソフトウェアによる自動検出のための手法確立を進めた。また、検出数が少ない天体グループのSFDを推定するために自らの観測データとアーカイブデータを合わせたデータセットに自動検出を適用し、多数の天体サンプルを確保することに成功した¹⁷⁾。この経験はSuprime-Camの後継機であるHyper Suprime-Camデータの解析に活かされ、効率的な移動天体検出プロセスが完成した。

1.4 Sub-km小惑星の物質組成と内部構造

ここまでは単色バンドの観測だったが、少し欲を出して、小惑星の物質組成や内部構造を推定できる方法はないか？ と考えた。先にsub-kmサイズの小惑星は小天体グループ内での衝突進化を読み解く鍵であると述べた。天体が衝突でどのように崩壊するかはその天体の物質組成や内部構造が大きく関係する。一般に小惑星の物質組成は実験室で詳細に組成を調べることでできる隕石（特に熱で溶けていないコンドライト隕石は変成していない太陽系初期物質を内包する小惑星のかけら

である）の反射スペクトルや色と比較して推定する。

また、微惑星の衝突合体／崩壊の結果形成された小惑星は、衝突破片が重力で再集積した内部構造（破片集積体と呼ばれる）をもつと考えられるが、破片が重力で集合しただけの天体は高速自転すると壊れてしまうので、破片集積体の自転周期には限界自転周期が存在する。実際既知の小惑星の自転周期分布には2.2時間という境界が見られ^{*7}、この限界自転周期より高速で自転できる小惑星は一枚岩の天体と考えられる。

このように、小惑星の反射スペクトルや色、自転周期を調べれば太陽系初期物質や微惑星の内部構造につながる情報が得られるのである。

色より反射スペクトルを得たほうが小惑星の物質組成に直結する「小惑星型」を判断しやすいが、sub-kmの小惑星は暗くて分光観測を行うには積分時間がかかりすぎる。そこでSuprime-Camで多色測光し、バンド間の明るさの差である色（われわれはBとRバンドで観測し、B-Rカラーを求めた）を算出する。Suprime-Camで黄道面上の衝付近を撮像すると、一視野に100個あまりのメインベルト小惑星が写るので、一晩の観測でも1,000個もの小惑星の色を測れる。

*7 2.2時間の境界はスピンバリアと呼ばれる。

一方、小惑星の自転周期は一つの小惑星の光度変化を数日間連続して観測して得られるライトカーブから推定する。自転周期はライトカーブを周期解析してみるまでわからない。数分で自転する小惑星もいれば、100時間以上の長い自転周期をもつ小惑星もいる。そして一般には望遠鏡の視野内に偶然小惑星が複数個含まれることはほぼないので、当然小惑星を1個ずつ観測してライトカーブを得ることになり、小惑星の光度曲線の観測は甚だ効率が悪い。しかしSuprime-Camならば一視野に約100個の小惑星が写る。視野端の小惑星は一晩の観測中に視野から出ていくが、視野中心付近の小惑星はMBAの移動速度なら視野中に収まる。つまり、Suprime-Camならば100個の小惑星のライトカーブが同時に得られるのだ。

このような背景のもと、中村先生、ブディ・デルマワンさん^{*8}と吉田は、小惑星をB-Rカラーで分けてサイズ頻度分布を調べる観測を行いながら、一視野だけ100個の小惑星のライトカーブの同時撮像観測を行う観測提案を出した。このプロポーザルは採択され、2001年10月に3人でハワイ島に観測に赴いた。

1.4.1 Sub-km MBAのS/C比とSFD

MBAは、反射スペクトルの異なるC-complexとS-complexに大分類される。C-complexの主な構成員は炭素質コンドライト隕石の母天体と考えられるC型小惑星であり、S-complexの主な構成員は普通コンドライト隕石の母天体と考えられるS型小惑星である^{*9}。炭素質コンドライトは普通コンドライトより発見・回収される数が少ない。そもそも地球近傍に到達する小惑星の数の比がS型とC型では大きく異なるが、加えてC型はS型よりもろく壊れやすいので、隕石として残りにく

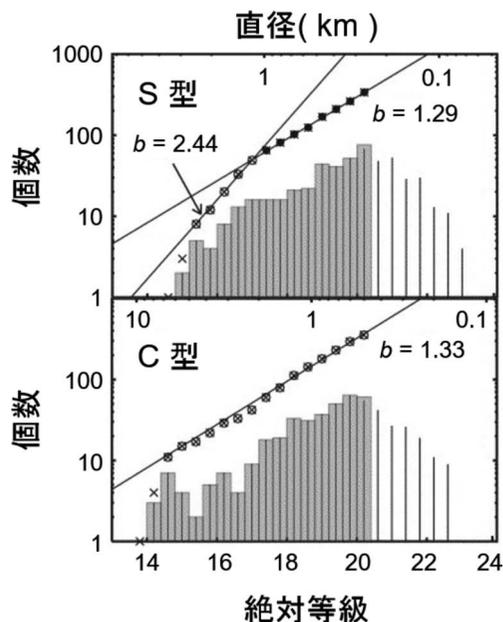


図2 S型(上)とC型(下)のSFD. 直径1 km以下では大きな違いはなかった. たて軸は $N(>D) \propto D^{-b}$ の N の倍.

いためだろう。脆さが異なるということは、S型、C型小惑星ではSFDが異なる可能性がある。

2001年10月の観測では1,001個のMBAを検出した。それらのB-Rカラーを測定してC型($B-R < 1.1$)とS型($B-R > 1.1$)に分類し、それぞれsub-kmサイズでのSFDを求めたところ、図2に示すようにべき指数 b はS型が1.29でC型が1.33だった。若干違いがS型とC型で大きくSFDが異なることはなかった^{18), *10}。

B-Rだけでは小惑星の細かい分類ができないので、上記のSFDにはS型とC型以外のMBAも多少混入している。小惑星の分光型別のSFDの調査にはやはり分光観測が必要だと感じた吉田は、後に国立天文台の八木雅文さんとSuprime-Cam

^{*8} 当時インドネシアのバンドン工科大学から東大に留学し、中村先生のところで一緒に研究をしていた。

^{*9} 可視域で太陽とよく似たスペクトルを示す小惑星の集団をC-complex、可視域で太陽より赤いスペクトルを示す小惑星の集団をS-complexと呼ぶ。可視の多色測光では細かい小惑星型の分類は不可能なので、C-, S-complexesの中にはC型、S型以外的小惑星も混じっているが、C型、S型小惑星は各complexの大半を占めるので、ここではC-, S-complexesをC型、S型で代表させる。

のグリズムフィルターによる観測に挑戦した(3章).

またわれわれはメインベルトの領域別にS型、C型の相対数も調べた. Sub-kmのサイズ領域では内側のメインベルトでのみS型の比率が高く、他の領域ではC型の比率が圧倒的に高いことがわかった¹⁸⁾.

1.4.2 100個のsub-km小惑星ライトカーブ同時観測!

一方、デルマワンさんはSuprime-Camの一視野に127個の小惑星を見つけて各小惑星の光度変化を測定し、83個のsub-km MBAについて、7-8時間分の信頼できるライトカーブを得た. 自転周期が20時間以上の小惑星が10個、自転周期が0.51-10.38時間の小惑星が73個、このうち33個が2.2時間以内の高速自転小惑星だった.

面白いことに、高速自転小惑星のライトカーブの振幅は、それ以外の小惑星のライトカーブの振幅に比べて全般的に小さかった. これは高速自転小惑星は光度変化が少なく、球形に近い形状であることを示唆する. これより小惑星は形成過程から予想されるとおり破片集積体で、細長い形状では自転が速いと壊れてしまうと言えないだろうか? 細長い形であってもそれが一枚岩の小惑星ならば高速自転でも分裂しないが、破片集積体では自転が速くなれば破片をまとめている重力より遠心力がまさって天体が崩壊する. 連星系をなす小惑星の自転周期分布を見ると多くの連星系で自転周期がスピンバリア(2.2時間)に近い(<http://www.alcdef.org>). このことからYORP効果¹¹⁾で小惑星がスピナップして分裂し、連星が形成される過程が存在すると推察されている.

Sub-km MBAでスピンバリアを超えて自転す

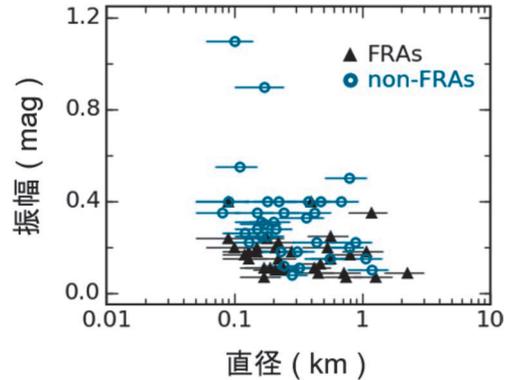


図3 Suprime-Camでのライトカーブ観測で検出されたMBAのライトカーブの振幅と直径の関係. 高速自転小惑星(FRAs:▲)の平均振幅は高速自転小惑星でない小惑星(non-FRAs:○)より小さい.

る高速自転小惑星が見つかり、それらの多くが球に近い形をもつことはデルマワンさんの博士論文の主要な内容となった²⁰⁾⁻²²⁾.

1.4.3 高軌道傾斜角sub-km小惑星のSFD

小惑星のSFDは小惑星の組成や内部構造のみならず、衝突速度でも変化する可能性があると考えた寺居は、軌道傾斜角の大きい小惑星は軌道傾斜角の小さい小惑星に比べて平均衝突速度が大きいことに着目し、それらを検出しやすい高黄緯領域(+25度付近)と低黄緯領域に分けてSuprime-Camでサーベイ観測を実施した. その結果、軌道傾斜角が約15度以上のMBAのSFDは、全体的に低軌道傾斜角のものよりも緩やかな傾斜(=べき指数が小さい)をもつことがわかった²³⁾(図4). SFDのべき指数が小さいということは、大きい小惑星と小さい小惑星の個数差が小さいことを意味する. このことから、超高速衝突(約10 km/s以上)では、大きな小惑星は衝突破壊強度が相対的に大

*10 後にわれわれの論文を読んだルーマニア出身の研究者(現在はLa Palma勤務)から、ルーマニアの学生たちと一緒にSuprime-Camのデータを使ってNEAを探したいので協力して欲しいという要請がきた. 彼らは長い時間をかけてアーカイブ画像にNEAを見つけ、つい最近その結果が出版された¹⁹⁾. Suprime-Camの画像は世界の研究者に利用されているのだ.

*11 不規則形状の小惑星では、吸収された太陽光を再放出する際に等方的に放出されないために自転運動を変化させるトルクを生じ、自転が速くなったり遅くなったりする.

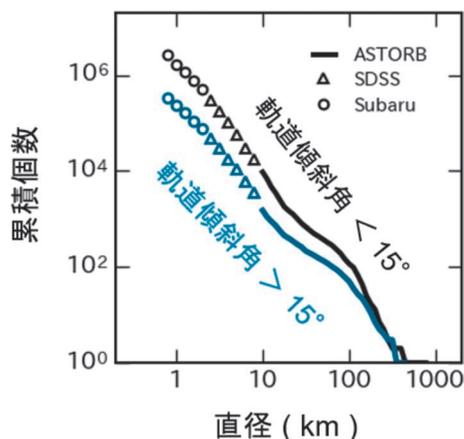


図4 軌道傾斜角別MBAのSFD。既知小惑星カタログ (ASTORB)、SDSS移動天体カタログ、およびSuprime-Camデータの解析結果を組み合わせた。黒：軌道傾斜角15度未満、青：軌道傾斜角15度以上の小惑星のSFD。

きくなって生き残りやすくなるという特性をもつと推測される。

1.5 より遠くへ—木星トロヤ群小惑星のSFD

Suprime-Camの画像にはMBAより頻度は低いが、遠くの太陽系小天体も写る。そこでMBAの次に数多く検出できた木星トロヤ群小惑星 (Jupiter Trojans (JT)) のSFDも調べてみた。木星のL4, L5ラグランジュ点付近にはMBAと同じくらい多くの小天体があると推定されているが、それらはより遠くて暗いので、当時の望遠鏡で検出できたのは直径約5 kmより大きい天体だけだった。MBAでは微小小惑星を直接検出して初めて微小小惑星の数が大きいサイズの小惑星のSFDから推定されるよりずっと少ないことがわかった。JT群でも総数を見積もるには小さい天体を直接検出してSFDを求める必要がある。

そこで吉田と中村先生はこれまでに取得したSuprime-Camの画像を精査し、JTに相当する移動速度の天体をL4点付近に51個 (L4群)、L5点付近に62個 (L5群) 見つけた。当事知られていたJTの平均的な反射率0.04を仮定すると、0.7–13 kmの直径に相当した^{24), 25)}。Jewittらのサーベ

イ観測²⁶⁾ やSDSS²⁷⁾ でもJTのSFDは報告されていたが、それらのサーベイで主に検出できるJTは直径数km以上である。われわれは当時知られていたJRのSFDのべき指数 ($b \sim 2$) が少なくとも直径2 kmのサイズ領域まで続くことを確認した^{24), 25)}。

JTは、ある時点で木星に捕獲された微惑星が現在まで残っているものである。不思議なことにL4点周りのほうが、L5点周りより天体数が多い。このことは以前から知られていた。けれども円制限3体問題の枠組みではL4とL5周りの軌道の安定性に違いはないし、一般的なN体系として考えても、捕獲に要する時間スケールが長くなればなるほど捕獲数の差はなくなる。したがって、昔から知られていたL4, L5の天体数の非対称性は典型的な少数統計による見掛けの違いであり、サーベイ観測が進んで多くのJTが見つければその差は縮まると多くの人が考えていた。しかしながら中村先生がL4とL5群での天体の空間分布から各群の総数を見積もってみると、L4のほうがL5より1.8倍も多かった²⁸⁾。観測バイアスではなく、L4とL5群で天体数に大きな差があるのである。この非対称性は、JTの捕獲が平均的な対称性を獲得するほどの長時間を経ないうちに生じ、また完了したことを意味する²⁹⁾。もしくはJTの現況 (SFDや軌道分布) は捕獲時の状況をあまり反映せず、何らかの外因・内因による進化が発生したという仮説が成立するかもしれない。

2. サイズ分布・色・自転周期から太陽系の進化を読み解く

2.1 アポロサイエンティストとの共同研究

吉田がこの研究を始めた頃は、「SFDを調べて何が面白いのか？」と他の研究者によく言われた。太陽系小天体群ごとにSFDや空間分布を調べて太陽系小天体の総質量を推定することは太陽系形成初期から現在までの惑星形成過程や力学進化を理解するうえで不可欠であるが、一つの天体群のSFDを調べただけで大発見という派手な研

究ではない。しかし形成年代の知られる天体衝突痕(クレーター)の研究と結びついたとき、太陽系小天体のSFDの研究は俄然その輝きを増す。

2002年吉田は台湾の国立中央大学のポスドク研究員だった。その頃、若い小惑星族に属した小惑星のライトカーブ(その詳細は本稿では述べない)を観測するための観測サイトを探していた。その中で、ひょんなことから米国アリゾナ大学の月惑星研究所でRobert Strom教授(以下ではBobと表記)とRenu Malhotra教授に会った。Renuは太陽系力学、とりわけ惑星の動径方向移動の提唱者として超有名な研究者だが、私がKitt PeakやMt. Grahamの施設においてアリゾナ大学がもっている望遠鏡時間を使うことを可能にしてくれた。この時期にRenuのところに滞在していた国立天文台の伊藤孝士さんが仲介してくれたのだが、彼もまたアリゾナでの小惑星観測に参加した^{*12}。彼らとの出会いが端緒となり、2年ほどの試行錯誤の末に完成した論文がScience誌に掲載された「The origin of planetary impactors in the inner solar system」という論文である^{30), 31)}。この研究の構想を1970年代から温めていたBobに敬意を表し、筆頭著者は彼になった。Bobは1960-1970年代のアポロ計画の現場の中心にいた地質学者である。奥様が日本人で、大の親日家でもある。10年ほど前、「ザ・ムーン」^{*13}という映画の中で、Neil Armstrong船長らの月面着陸時にトラブルがあり、かろうじて着陸できたというシーンがあったが、ある年にBobが奥様とともに来日したとき、歌舞伎座近くのファミリーレストランで、彼はビールを飲みながらアポロ11号が初めて月面着陸したときのことを吉田に話してくれた。この映画はBobのようにアポロ計画に参加していた人々の証言を

もどに制作されたから当然ではあるのだが、Bobの話は映画のシーンのとおりだった。「月面は予想よりごつごつしていて、安全に着陸できそうな場所がなかなか見つからなかったんだ。そのうち燃料が少なくなり、みんなハラハラだった。ようやく着陸できたが、今度はそこがどこかわからなかった。予定とは全く違う場所に降りたからね。」そう言うと、Bobはビールをグイと飲み干した。

アポロ宇宙船が月の石や砂を持ち帰ってきて地上の実験室で詳細な分析が行われたため、月面はいくつもの場所で放射性同位元素による絶対年代がわかっている。現在の月には造山運動も風雨による侵食もないので、太古の昔にできた天体衝突クレーターが非常によく保存されている。地球から暗く見える「海」は、クレーターは少なく、比較的新しくできた地形で、今から32-38億年前の間に形成された。一方で多数のクレーターに覆われ、明るく見える「高地」は古く、「海」よりだいぶ前に形成された。高地にはさまざまなサイズのクレーターがあるが、海には小さいクレーターが多く、高地と海でクレーターのSFDは異なる。クレーターのSFDをRプロット^{*14}というクレーターの専門家の間でよく使われる特殊な形式で表示してみると、高地のクレーターのSFDはRプロット上で波打った形をしており、海のクレーターのSFDは比較的平坦な形をしている(図5)。火星の北半球の平原のクレーターのSFDは月の海のクレーター(比較的新しい)のSFDと似ている。火星の南半球や水星(カロリス盆地以外)のクレーターのSFDは、月の高地に見られる古いクレーターのSFDと似ている。月の海は高地に比べて数億年は若いから、これらのSFDの違いは月の海が形成された事象の前後で衝突天体のSFD(そし

^{*12} 彼は以下で述べる論文において衝突天体の軌道進化と速度分布を計算した。

^{*13} 原題 “In the Shadow of the Moon,” 2007年の英国作品。

^{*14} RプロットはCrater Analysis techniques Working GroupがクレーターのSFDの違いをより見やすくするために工夫した表示方法で、R-プロット上では $N(>D) \propto D^{-b}$ のべき指数 b が3のサイズ頻度分布が平らに、 $b=2$ が右上がり、 $b=4$ が右下がりの形に表示される。

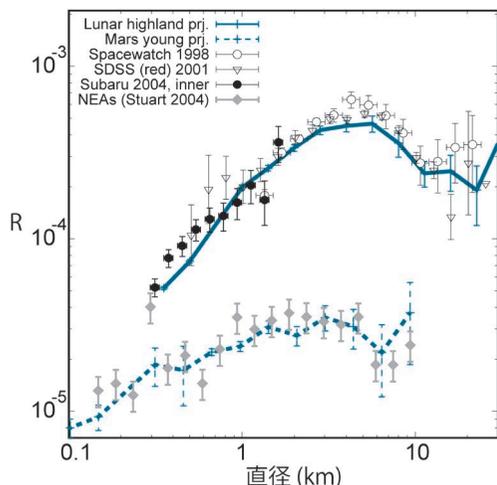


図5 クレーターを作った衝突体(青実線: 月の高地の衝突体, 青点線: 火星の若い平原の衝突体)と小惑星のSFDの比較(○Spacewatch survey, ▽SDSS, ●われわれの観測から得たMBAのSFD, ◆NEA). MBAと古い時代の衝突体, NEAと新しい時代の衝突体のSFDが似ている.

て衝突頻度)が質的に変化したことを意味すると考えられる。

先に述べたが、SFDはその天体群の初期の形成環境を色濃く反映する。よって現在は別々の天体群でも、SFDが似ていれば、それらの天体群がかつては同じ領域で形成された可能性がある。一方、SFDが異なれば、その起源は異なる可能性が高い。こうした考察から、クレーターのSFDが似ている月の高地、火星の南半球、水星表面にクレーターを作った衝突体は同一領域から来た可能性が高い。一方でSFDが異なる月の海、火星の北半球など比較的新しい時代にクレーターを作った衝突体は、古い時代とは別の天体群起源と考えることができる。

ではこれらの衝突体はどこからきたのか？ クレーターのSFDからそれらを作った衝突天体のSFDを復元し、それらを現在の太陽系小天体のSFDと比較してみよう。すると、0.1-数十kmの

広いサイズ範囲で古い時代の衝突体とそっくりのSFDをもっているのは、MBAだった。一方、新しい時代の衝突体はNEAとよく似たSFDをもつ。これらのSFDの比較で重要な役割を果たしたのは、すばる望遠鏡とSuprime-Camで得たsub-km MBAのSFDだった(図5の●)。

それまでは直径1 km以下のMBAのSFDを十分な精度で見積もることができず、NEAとMBAのSFDを同じサイズ領域で比較できなかった。実際吉田らの研究以前はNEAとkmサイズMBAのSFDのべき指数は似ていたもので、MBAとNEAのSFDに違いはないと考えられていた。ところが、両者を直径1 km以下まで比較してみると、MBAとNEAのSFDが明確に異なっていたのである。この研究の結果と経緯については天文月報の記事³²⁾にまとめた。

NEAは時折り地球型惑星や月に衝突する可能性は大いにあるが、MBAは地球型惑星軌道の完全に外側にあり、地球型惑星と軌道交差することはない。古い時代にできたクレーターのSFDは、メインベルト全体がそのまま内側に落ちてきたように広いサイズ領域でMBAのSFDとそっくりだった。このSFDの一致、そしてその後の新しいクレーター群に関するSFDの不一致はどのように説明されるだろうか？ 太陽系形成過程で大惑星らの軌道が大きく変化し、周囲の微惑星を散乱する太陽系大動乱の時期があったという新しい太陽系形成モデルが2005年に提案された^{*15}。このモデルによれば、木星の軌道の変化とともに、メインベルトにある木星との平均運動共鳴帯^{*16}の位置が徐々に移動した。MBAは平均運動共鳴帯に取り込まれたまま、この移動に巻き込まれ、離心率が増大し、その結果として惑星に接近して散乱され、短期間で多くが地球型惑星領域に降り注ぐ。この過程は小惑星の質量によらずすべてのサイズの小惑星に有効である。つまりこの過程によりメ

*15 いわゆる Nice モデルと呼ばれるもの。なお、この案は現在もまだ改定が続いている。

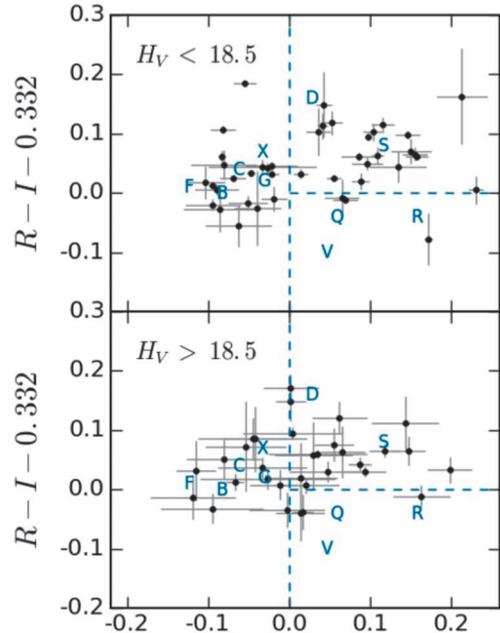
*16 二つ以上の天体の平均運動(平均の公転角速度)がおおむね整数関係にある状況。

インベルトから放出された天体群はMBAと同じサイズ頻度分布をもつことになる。つまりNiceモデルとクレーターと小惑星のSFDから推測されるシナリオでは、大惑星の軌道が変化した時代に、大惑星の軌道変化に伴って生じた平均運動共鳴帯移動に巻き込まれたMBAが地球型惑星領域に入り込み、月や地球型惑星表面にクレーターを作った。大惑星の移動が止まると平均運動共鳴帯の移動も止まるので、それに巻き込まれるMBAがなくなり、メインベルトから多数の小惑星が落ちてくることはなくなる。新しい時代のクレーターは、Yarkovsky効果^{*17}によりゆっくりと平均運動共鳴帯に送り込まれた小さいMBAが地球型惑星領域に入り込むという穏やかな時代になったと推察される。

現在までに、放射性同位元素による正確なクレーターの形成年代がわかっているのは月面のみである。しかし、もしJTや氷衛星、太陽系外縁天体でクレーターの絶対年代が測定できれば、太陽系全体での天体の軌道進化過程が明確になるだろう。今後の惑星探査に期待したい。

2.2 NEAは近地球惑星領域で脱皮する？

NEAR Shoemakerやはやぶさ等の惑星探査や室内実験により、メインベルトに多いS型小惑星はQ型小惑星（普通コンドライト隕石と同じ反射スペクトルをもつ）の表面が宇宙風化で変化した天体であることが判明した。S型小惑星はメインベルトの内側に多く、そこで生じた天体衝突破片がYarkovsky効果で長い時間をかけて惑星との平均運動共鳴に入り、離心率が増大し、惑星散乱を経てNEAになり、その一部が隕石としてわれわれの手元に届くという輸送ルートは1990年代から想定されていた。そこで吉田はメインベルトで小さい小惑星を見れば、S型小惑星の元であるQ型小惑星が多数見つかるものと予想し、メインベルトでQ型小惑星を見つける多色測光サーベイ観測を



$$0.7071(B - V) + 0.7071(V - R) - 0.82$$

図6 Suprime-Camで検出されたMBAのカラー分布。上が絶対等級が18.5等より明るく、下はそれより暗いMBA。横軸で0を境に左がC-complex、右がS-complex。S-complexではさらに縦軸の0を境にS、D型とQ型を含むそれ以外に分かれるが、Q型小惑星はほとんどいなかった。

計画し、2004年8月にすばる望遠鏡とSuprime-Camで実行した。

この観測ではB、V、R、Iの4バンドを使ってS、Q型小惑星を分類した。4バンドのデータが取れたMBAは150個だった。データ解析は台湾の国立中央大学のLinさんが担当して論文にまとめた³³⁾。結果を述べよう。先行研究で報告されていたNEAのQ/S比（S型小惑星に対するQ型小惑星数の割合）は0.5-2.0であったが、この観測で得られたMBAではQ/S<0.05だった。予想に反して、メインベルトではQ型小惑星の数が大幅に少なかったのである。このことは、Q型小惑星はメインベルト内での衝突で作られるのではなく、近地球領域

^{*17} 小惑星の熱放射の非等方向性が原因で起こる軌道要素経変化。小さい小惑星ほど軌道長半径に目立つ変化が認められる。

で作られることを強く示唆している。Q型NEAの軌道進化を追跡した或る研究で、すべてのQ型NEAが過去10万年間に惑星と近接遭遇を起こしていることがわかっている。このことから惑星との近接遭遇の際にS型小惑星の表面のレゴリス(表土)が剥がれて、表面下の宇宙風化していない面が露出してQ型小惑星になるのだというモデルが提案された^{34), 35)}。またQ型小惑星の形成には、YORP効果が小惑星の自転を加速して小惑星の表面のレゴリスが剥がれることに一役買っているという説³⁶⁾や、近地球領域や太陽近傍はメインベルトより温度が高いため、太陽光で熱せられた表面が崩壊し、新鮮な表面が露出するという説もある³⁷⁾。これらの説はいずれもメインベルトと近地球領域でのQ/S比の違いは、NEA表面が近地球領域で剥がれたか、あるいは作り変えられた結果である可能性を支持する。

2.3 不規則衛星の起源

Suprime-Camはさまざまな太陽系内天体の観測に威力を発揮したが、その一つに惑星の衛星も挙げられる。Suprime-Camを使った観測で、木星から海王星までの巨大惑星の新衛星が多数発見されてきた^{*18}。そのほぼ全ては不規則衛星である。周惑星円盤中で形成されたとされる規則衛星に対し、不規則衛星の軌道は軌道長半径・離心率・傾斜角がいずれも大きく、惑星の自転と反対向きに惑星周りを公転する逆行軌道にあるものが多い。これらは太陽系初期に太陽系外縁部起源の小天体が惑星に捕獲されたと考えられている。しかし、海王星の第2衛星Nereidは軌道要素こそは不規則衛星に分類されるものの、周惑星円盤内で形成された後に第1衛星Tritonからの重力摂動によって軌道が大きく変化したとするモデルが提唱されていた。Nereidのライトカーブは振幅や周期が無秩序に変動するとの観測報告があり、これが海王星の潮汐力による自転の不安定化で説明されるこ

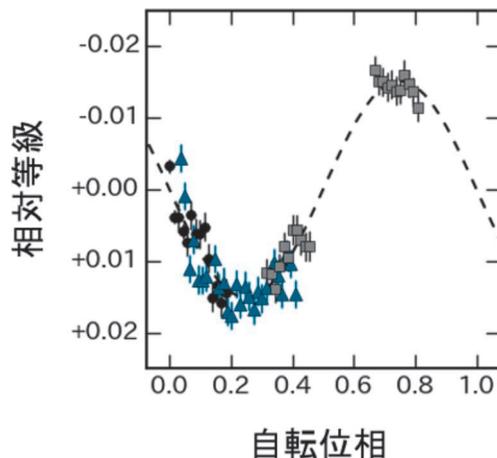


図7 Suprime-Camによる3晩分の観測データを周期解析して得られた海王星衛星Nereidのライトカーブ。●、▲、■はそれぞれ2008年9月1, 2, 29日(UT)に取得されたデータ。破線は最適モデル曲線。

とから上記モデルを支持する証拠とされていた。一方、近年の観測ではライトカーブの変動を否定する報告もあった。そこで寺居は海王星近傍の領域を撮像したSuprime-Camデータを使ってNereidの高精度のライトカーブを取得した(図7)。周期解析の結果、Nereidは安定的な自転状態にあることがわかった⁴⁰⁾。

3. まとめ

すばる望遠鏡の口径と、Suprime-Camの視野があれば、移動天体はどの画像にも必ず写っている。以前に八木雅文さんとSuprime-Camの画像を調べていた吉田は彗星を見つけたこともある。但し新発見ではなく、リニア望遠鏡サーベイで見つかった彗星が近日点を通過した後、木星付近まで移動したものを再発見したものだ。しかし、太陽から5天文単位当たりでもなお彗星の尾が見えたことに少し驚いた。

特定の条件を満たした観測で取得した画像でな

*18 Scott S. Sheppardらの観測により、木星および土星の衛星がそれぞれ20個以上、天王星衛星が2個³⁸⁾、海王星衛星が1個³⁹⁾発見されている。

いと、そこに写っている移動天体から正しい軌道
を導くことはできないので太陽系小天体の研究に
は使えない。特定の条件とは(1) 太陽と地球を
挟んで正反対の方向である衝の位置付近を観測し
たデータで、(2) 検出したい移動天体の移動速
度に適した時間間隔で、同一視野が数回撮像さ
れていることである。この条件で撮ると、NEA 4
から太陽系外縁天体までさまざまな太陽系小天
体が一度に検出でき、各天体群に合わせたいろ
んな研究ができる。特にすばる望遠鏡と Suprime-Cam
の組み合わせで得たデータは、どの太陽系小天
体群でも既存の観測よりずっと小さいサイズの
天体まで検出できたので、すべての結果が新し
かった。多くの論文を生み出すことができたのは、
間違いなくすばる望遠と Suprime-Cam のおかげ
である。

査読付き集録には書いたが論文にはしてい
ないデータがまだ5日分残っている。このうち3
日分はグリズムフィルターでの観測である。グ
リズムフィルターの観測は、0次光や1次光の
スペクトルが画像に写りこむので、混みいつ
た星野ではスペクトルと恒星の像が重なり、
スペクトルの測定に具合が悪い。そこで可視
光ではほぼ真っ暗な天の川銀河中の暗黒星
雲を背景の星を遮るカーテンとして使うとい
う天才的アイデアを八木雅文さんが提案され、
この観測は実行された⁴¹⁾(本特集の八木さん
の記事参照)。Suprime-Cam 最後の夜(2017
年5月30日)に撮ったデータもこれから解
析する。これらのデータから、さらに多くの科
学成果を報告できると思う。

時代は Suprime-Cam から Hyper Suprime-Cam
へと移っていく。Suprime-Cam の約7倍の視
野をもつ Hyper Suprime-Cam は太陽系小天
体サーベイの強力な武器で、効率よくサーベ
イを進めることができる。Suprime-Cam の
サーベイで今まで見えなかった微小小惑星
の世界が見えてきた。Hyper Suprime-Cam
は今まで観測効率が悪くサーベイがかなか
進まなかった太陽系外縁部天体の

新しい世界を確実に切り開いてくれるだろう。

謝 辞

吉田の指導教官だった中村先生と Robert Strom
教授を紹介してくれ、一緒に論文を書いた伊藤
孝士さんには原稿を読んでいただき、事実確認
にご協力いただきました。また有益なコメント
もいただきました。深く感謝いたします。この
原稿の多くの部分は17年に及ぶ吉田の記憶と
私見に基づくものです。確認しきれず事実と
異なる事項があるかもしれませんが、どうぞご
容赦ください。ここでは Suprime-Cam で得た
太陽系小天体関係の吉田、寺居が関係する研
究成果を主に述べさせていただきます。これ
以外にもさまざまな研究が行われており、太
陽系小天体関係全部に言及できなかったのは、
ひとえに吉田の知識不足によるものです(紙
面不足の要因もちょっとある)。どうぞご容
赦ください。

Suprime-Cam が共同利用で活躍し始めて約
17年間、さまざまな研究成果を出すことが
でき、外縁部天体の搜索を精力的にやってい
る海外の研究グループの活動と合わせて、
Suprime-Cam は太陽系進化の研究に実に偉
大な貢献を果たしたと思います。開発者の
皆さん、運用者の皆さん、そのほかすべて
の関係者のみなさんに感謝いたします。

参考文献

- 1) Yoshida F, et al., 2001, PASJ 53, L13
- 2) Yamamoto N., et al., 2008, PASJ 60, 285
- 3) Fuentes C. I., Holman, M. J., 2008, AJ 136, 83
- 4) Fuentes C. I., et al., 2009, ApJ 696, 91
- 5) Fraser W. C., Kavelaars J. J., 2009, AJ 137, 72
- 6) Fraser W. C., et al., 2010, Icar 210, 944
- 7) Sheppard S. S., 2010, AJ 139, 1394
- 8) Sheppard S. S., Trujillo C., 2016, AJ 152, 221
- 9) Pike R. E., et al., 2017, AJ 154, 101
- 10) Terai T., et al., 2017, PASJ, in press (doi:10.1093/pasj/psx105)
- 11) Lin H.-W., et al., 2017, PASJ, in press (doi:10.1093/pasj/psx082)
- 12) Chen Y.-T., et al., 2017, PASJ, submitted (arXiv:1705.

- 01722)
- 13) 吉田二美, 中村士, 2002, 天文月報95, 498
 - 14) Yoshida F., 2002, 博士論文, Kobe University
 - 15) Yoshida F., et al., 2003, PASJ 55, 701
 - 16) Yoshida F., Nakamura T., 2004, AdSpR 33, 1543
 - 17) Terai T., Itoh Y., 2011, PASJ 63, 335
 - 18) Yoshida F., Nakamura T., 2007, P&SS 55, 1113
 - 19) Vaduvescu O., et al., 2017, AN 338, 527
 - 20) Dermawan B., 2004, 博士論文, Univ. of Tokyo
 - 21) Dermawan B., et al., 2011, PASJ 63, 555
 - 22) Nakamura T., et al., 2011, PASJ 63, 577
 - 23) Terai T., et al., 2013, AJ 146, 111
 - 24) Yoshida F., Nakamura T., 2005, AJ 130, 2900
 - 25) Yoshida F., Nakamura T., 2008, PASJ 60, 297
 - 26) Jewitt D. C., et al., 2000, AJ 120, 1140
 - 27) Szabó G. M., et al., 2007, MNRAS 377, 1393
 - 28) Nakamura T., Yoshida F., 2008, PASJ 60, 293
 - 29) Hou X., et al., 2016, CeMDA 125, 451
 - 30) Strom R. G., et al., 2005, Science 309, 1847
 - 31) Strom R. G., et al., 2015, RAA 15, 407
 - 32) 吉田二美, 2006, 天文月報99, 298
 - 33) Lin H. W., et al., 2015, Icar 254, 202
 - 34) Binzel R. P., et al., 2010, Nature 463, 331
 - 35) Nesvorný D., et al., 2010, Icar 209, 510
 - 36) Polishook D., et al., 2014, Icar 233, 9
 - 37) Delbo M., et al., 2014, Nature 508, 233
 - 38) Sheppard S. S., et al., 2005, AJ 129, 518
 - 39) Sheppard S. S., et al., 2006, AJ 132, 171
 - 40) Terai T., Itoh Y., 2013, PASJ 65, 46
 - 41) Yoshida F., et al., 2014 in *Advances in Geosciences*, eds. A. Bhardwaj et al. (World Scientific, Singapore) 43, 2011

Solar System History Unveiled by the Deepest and Widest Field CCD Camera: Suprime-Cam

Fumi YOSHIDA¹⁾ and Tsuyoshi TERAI²⁾

¹⁾ Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma, Narashino, Chiba 275-0016, Japan

²⁾ Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan, National Institutes of Natural Sciences (NINS), 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI 96720, USA

Abstract: The combination of Subaru telescope and Suprime-Cam which has a wide field of view is the best instrument to search for small solar system bodies (asteroids, comets, trans Neptunian objects, etc.). It can take deepest images and detect smallest bodies in the Solar System. That's why all results obtained with Suprime-Cam were the first research results in the world. The authors continued research on small solar system bodies using image data taken by Suprime-Cam for ~18 years from its first light. We also took the data at the last run of Suprime-Cam (May 30th, 2017). Here we would like to look back on our research that we walked with Suprime-Cam with our deep gratitude to Suprime-Cam.