

HSCで探る太陽系小天体

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@perc.it-chiba.ac.jp

HSCすばる戦略枠サーベイ（以下HSCサーベイ）は2014年3月から5-6年間ですばる望遠鏡の300夜を使い、直径1.5度の視野をもつHyper Suprime-Cam（HSC）で約1,400平方度を掃天する計画である。大口径のすばる望遠鏡の集光力とHSCの広視野の利点を活かし、既存のどのサーベイよりも小さい太陽系小天体を効率良く検出できる。ここではHSCサーベイのデータを使って、これまでに行われた太陽系小天体に関する四つの研究を紹介する。このうち三つはPASJの特集号：Subaru Hyper Suprime-Cam Survey（Volume 70, Issue sp. 1（January 2018））に掲載され、残り一つ（ケンタウルス族のカラー測定）は2018年の終わりにPASJに掲載された。重力レンズや銀河進化をメインに設計され、多分野の研究者が共同で取り組んでいるHSCサーベイはすばる望遠鏡としては画期的な試みで、大きな研究計画を実現させるために有効な手段としては間違いないが、多分野のサイエンスからのさまざまな制限により、太陽系小天体研究に関しては理想的な条件で実行されているわけではない。対して、太陽系小天体専用サーベイを行えば、HSCは世界に類を見ないサーベイ能力を発揮する。HSCが導入されてから太陽系小天体の統計的研究の効率が格段に向上した。そのおかげで全地球的競争（第9惑星探し）に巻き込まれてしまった。このことについては本稿の最後で述べる。

1. HSC始動前

HSCによる観測が始まる前は、太陽系小天体の研究はSuprime-Camにたいへんお世話になった。天文月報2018年1月号のSuprime-Cam特集でも述べさせていただいたが、Suprime-Camには心から感謝したい。すばる望遠鏡の大口径と広視野CCDカメラの組み合わせは太陽系小天体サーベイをやるには最も理想的な観測装置である。Suprime-Camを使ったわれわれの研究を紹介する際にはいつも、「これまでで一番小さい太陽系小天体を効率的に見つけることのできる世界最高の装置」という謳い文句を使った。Suprime-Camからさらに広視野にアップグレードしたHSCになってからは、もはやどうやっても他の追従を許さない世界

最高のサーベイ観測装置になった。そのため世界中の研究者がHSCに群がり、われわれも第9惑星探しのような世界的競争に巻き込まれていく事態になった（第3章参照）。

「大型サーベイ計画があるので太陽系の研究者も検討に入りませんか？」と誰からお誘いを受けたのか申しわけないことに忘れてしまったが、HSCサーベイの構想には太陽系分野もかなり初期から入れていただき、2014年にHSCサーベイが始まる遥か前からHSCサーベイで達成できる太陽系科学をあれこれ検討したものである。何しろ世界ナンバーワンの装置を占有して大量のデータを取得することができるのだ。願ってもないことである。それまで日本ですばる望遠鏡を使って太陽系小天体のサーベイを積極的に行っていたの

はごく限られた研究者だけだったので、HSCサーベイは多くの人に太陽系小天体サーベイと関わってもらい、研究の裾野を拡げる絶好のチャンスでもあった。HSCサーベイは日本、台湾、プリンストン大学の研究者でデータをシェアする。当時台湾の国立中央大学には葉永烜（Wing-Huen Ip）教授率いる太陽系研究グループがあった。Ip教授リタイア後は多少縮小したと聞いたが、5年ほど前はPan-STARRS*¹やOSSOS*²など他国のサーベイ観測プロジェクトに積極的に学生を送り出し、ビッグデータをいかに扱うかについての基礎力をつけてきた。これに対して日本では太陽系小天体サーベイをテーマにした研究室はなく、プリンストン大学でHSCサーベイに関連する研究者に太陽系分野の人がいなかった。筆者は葉永烜教授の下で一時期ポスドクとして働いた経験があったので、日本の研究者のみならず、台湾の太陽系研究者にも積極的にHSCサーベイへの参加を呼びかけた。

われわれが知恵を出し合って決めたHSCサーベイでの太陽系小天体研究に関する科学目標は次の11項目である。

- (1) メインベルトに100 mサイズの近地球小惑星の前駆体を探す (PI. 浦川聖太郎)
- (2) 木星トロヤ群小惑星のサイズ分布から太陽系初期の惑星移動の証拠を探す (PI. 吉田二美)
- (3) メインベルト小惑星の彗星活動調査 (PI. 吉田二美)
- (4) 小惑星分裂イベントの調査 (PI. 木下大輔)
- (5) 逆行・高軌道傾斜角の太陽系外縁天体 (TNO) 探し (PI. Wing-Huen Ip)
- (6) カイパーベルトのHotとColdグループのサ

- イズ分布の推定 (PI. Shiang-Yu Wang)
- (7) 特異TNOs (高速自転かつ扁平な形状の天体) 探し (PI. Ying-Tung Chen)
- (8) TNOバイナリー探し (PI. Hsing-Wen Lin)
- (9) セドナ, 遠方準惑星, Inner Oort Cloud天体探し (PI. Matthew Lehner)
- (10) TNOsのサイズ分布の推定 (PI. 寺居剛)
- (11) No strengthを仮定した氷天体の密度推定 (PI. 高橋茂)

HSCサーベイが開始された段階で、さらに次の三つのサイエンス項目が付加された。

- (12) 多色測光で探るTNOsの光学特性 (PI. 寺居剛)
- (13) HSC画像上の光跡から微小近地球小惑星の空間分布を探る (PI. Ying-Tung Chen)
- (14) Comet Hunters citizen science projectによるメインベルト彗星探し (PI. Shiang-Yu Wang)

HSCサーベイの観測戦略が具体化するにつれて、次第に上述の科学目標の一部は達成困難あるいは非常に実施効率が悪いことが明らかになっていった。というのは、われわれはHSCサーベイのケーデンス*³が確定したうえで上記目標を決めたわけではなかったからである。太陽系小天体は恒星や銀河よりずっと地球に近いので、HSCで撮られたすべての画像に写る。それなら文句はないだろうと思われるかもしれないが、誤解である。太陽系小天体が最も集中しており（黄道面）、最も明るくなる場所（衝：太陽、地球、小惑星がこの順に一直線に並ぶ位置関係で、このとき小惑星は満月状態になる）を狙えば、HSCの1視野には約600-800個の太陽系小天体が映るが、黄緯が大きくなるにつれ太陽系小天体の数は激減する

*¹ Panoramic Survey Telescope as Rapid Response System, ハワイに設置された口径1.8 mの望遠鏡で、全天サーベイを行い、移動天体や突発天体を検出する計画。現在も継続中。

*² Outer Solar System Origins Survey, 口径3.6 mのCanada-France-Hawaii Telescope (CFHT) のMegaPrime Cameraを使って、多くの太陽系外縁天体を検出し、それらの軌道を決定する計画。2013年2月に開始された4年間のプロジェクト。

*³ ここでは、サーベイ視野の撮像の順番や露出間の時間間隔、フィルター交換のタイミングなど、単調な撮像以外にサーベイを遂行するうえで考慮が必要な総合の手順の意味で使っている。

し、衝から離れると写っている天体の速度からその天体が太陽系のどの位置にあるかの見積もりが難しくなる。さらに、太陽系小天体探しでは撮像間隔が重要である。太陽系小天体は同じ場所を2-3回撮像して、直線的に移動する天体を見つけるという手法で検出し、移動速度と明るさに基づいて同定する。太陽から遠いTNOはゆっくりと動くが、近くのメインベルト小惑星はTNOの10倍ほど速く移動する。したがって、撮像間隔が長くなれば、多くのメインベルト小惑星はHSCの視野から出て行ってしまい、2回目の撮像のときには全く別の天体が視野内に収まっていることになる。逆に撮像間隔が短すぎると、TNOのような動きの遅い天体は移動が見えないので検出できない。太陽系小天体のサーベイでまず重要なのは検出された天体までの距離をその天体の天球上の移動速度を元に算出することである。太陽からの距離によって小天体の天球上での移動速度は異なる。小天体の軌道離心率を0（すなわち円軌道）と仮定すると、「衝」の位置では地球の軌道速度成分と小天体の軌道速度成分の差が端的に現れ、検出された天体の移動量に基づいて検出された天体までの距離が決めやすい。また衝では小天体は満月状態で最も明るいので、より暗い太陽系小天体まで検出するには衝の位置をサーベイするのが良いのである。

ところが、HSCサーベイのメインサイエンスになっている重力レンズや銀河進化の研究を行う研究者にとっては良いシーングで指定の深さまでの画像が取れること、過去のデータもしくは多波長のデータと比較するためできるだけ過去にサーベイされた領域をサーベイしたい、観測が煩雑になるようなサーベイデザインはできるだけ避けたいなどの希望がある。このため、太陽系小天体探しが要求するようなケーデンスは必ずしもサーベ

イデザインに反映されるわけではなかった。それでもHSCサーベイで得られるデータの使い道はあるはずと、筆者はサーベイ検討会議の末席に出席し続けていた。

2. HSCサーベイデータで太陽系研究

HSCサーベイのデータでは、大きく分けて次の2種類の研究ができる。一つはサーベイで得られた光源カタログに既知の太陽系小天体を探し、それらの表面特性を調べることで、もう一つは小天体を発見し、それらの軌道やカラーや他の物理特性を求めることである。既知の天体を探す場合と、未知の天体を探す場合とでは搜索方法が異なる。

HSCサーベイで使われている広帯域フィルターは5種類 (g, r, i, z, Y) がある。一つの太陽系小天体が異なるフィルターで複数回撮像されていれば、その天体の平均的カラーを求めることができる。また5年間のサーベイ中に様々な太陽位相角（太陽—天体—観測者が成す角）で撮られたデータがあれば、その天体の太陽位相角依存性も推定可能になり、絶対等級やスロープパラメータ^{*4}が得られる。適切なデータセットがあれば、自転周期なども決定可能かもしれない。しかしながらHSCサーベイのケーデンスは太陽系小天体の検出に都合よくなっていないうえに、天候やサーベイの進み具合により変更されるので、どのようなデータセットが利用可能かはある程度サーベイが進んでからしかわからない。大口径のすばる望遠鏡で検出される太陽系小天体はほとんどが未知の天体で、数日間にわたって検出された天体だけが軌道決定できる。動きの遅いTNOsは約1週間継続される1回のHSCサーベイラン中に、同じ視野あるいは隣接した視野で何度も検出される可能性が高い。よって、HSCサーベイデータを利用して新発

*4 太陽位相角とともにその天体の明るさがどのように変わるかを表す指標。一般にアルベドが高い小天体のスロープパラメータは大きく、アルベドが低い小天体のスロープパラメータは小さいという特徴がある。

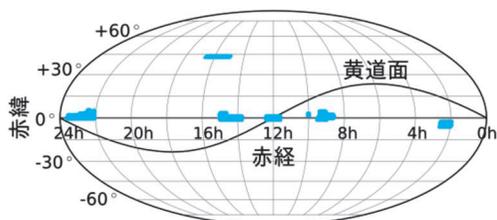


図1 HSCサーベイ開始から2016年9月までのサーベイ観測領域を青で示す。太陽系小天体が集中している黄道面付近よりそこから離れた領域のサーベイが多い。黄道面から離れるほど太陽系小天体の検出数は急速に減少する。

見のTNOのカタログが作れるかもしれない。さらにそのような天体は異なるバンドでも撮像されている可能性が高いので、カラーのデータも得られることになる。

われわれは2016年9月までに取得されたHSCサーベイのデータ(図1参照)を使って、以下に述べる四つの研究を行った。

2.1 30個の既知のTNOsのカラー測定¹⁾

本研究は国立天文台ハワイ観測所の寺居剛氏を中心に進められた。現在2,000個以上のTNOsが発見されているが、HSCサーベイで得られた画像にもこうした既知のTNOsはいくつも写っている。既知のTNOsは軌道要素がわかっているので、HSCの画像が撮像された日時から、その画像中に既知のTNOsがいるかどうか明確にわかる。ここではそうした既知のTNOsをHSCサーベイのデータから探し出し、それらのカラー分布を調べた。

TNOsの軌道分布は単純ではなく、軌道の特徴に従って四つの力学グループに分類される。

Classical: 40-50 auの軌道長半径(a)をもち、軌道離心率(e)が小さく、海王星とは軌道交差せずかつ海王星との軌道共鳴に入っていないカイパーベルト天体。

Scattered: 近日点距離(q)が海王星軌道に近く、 e は大きい。過去に海王星に散乱された可能性が高い天体。

Resonant: 海王星との平均運動共鳴にある天体群。冥王星はこのグループに属する。

Detached: q が海王星軌道よりずっと外側にあり、既知の惑星の重力の影響を受けない。一般に e も軌道傾斜角(I)も大きい。

太陽系外縁部にある天体群がこのような軌道の特徴をもつ力学グループに分けられるということは、その天体群が過去に複雑な力学進化に晒されたことを示唆する。かつてこの領域でどのような力学進化が起こったのか? それを読み解くために、TNOsのカラー(太陽からの距離と小天体のカラーに関連性があることから、カラーは天体の形成場所を反映すると考えられている)と軌道要素の関係を調べることは重要である。こうした考えからカナダの研究者を中心とする研究グループはTNOsの正確な軌道決定とそれらのカラーを測定するサーベイ(OSSOS)をCFHT(Canada-France-Hawaii望遠鏡)で4年かけて行った。HSCサーベイでは口径3.6 mのCFHTより大きいすばる望遠鏡を使うので、より小さいTNOsのカラーと軌道を決めることができる。しかしながら、OSSOSがそうだったように新しく発見したTNOの正確な軌道決定には数年かかり、すぐには結果が出せない。そこでHSCサーベイで得られた画像データで「既知」のTNOsを探すことを思いついた。既知の天体ゆえ軌道は精度よくわかっているので、どの天体がどの力学グループに属するか明確に定義できるからである(図2)。

膨大なデータセットの中から g, r, i, z, Y のうち四つ以上のバンドのデータがそろっている30個の既知のTNOsが見つかった。Detachedはいなかった。いろんなカラーと軌道要素を比べてみると I が6度でカラー分布が分かれることがわかったので、この研究では天体サンプルを $I \leq 6$ 度(Low- I)と $I > 6$ 度(High- I)に分類した。Resonantは外した。なぜなら、これらの天体は共鳴に入ったあとに e や I が変化した可能性があり、Scatteredとは別の力学履歴をもつからである。

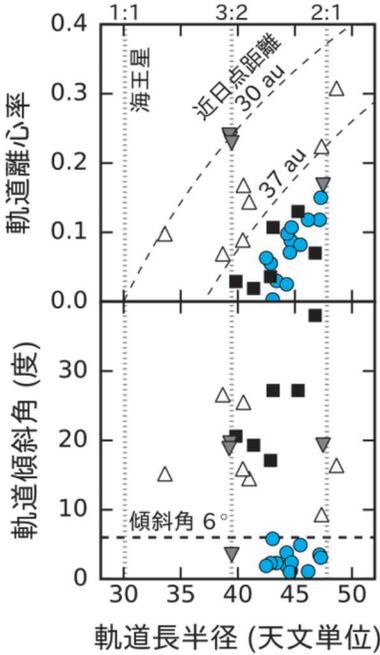


図2 HSCサーベイのデータから見つかった30個の既知のTNOsの軌道分布。● Cold classical (Classicalの中で $I \leq 6$ 度) 13個, ■ Hot classical (Classicalの中で $I > 6$ 度) 6個, △ Scattered 7個, ▼ Resonant 4個。

HSCサーベイでは観測日のシーイングサイズ、観測条件やその他諸々の事情によってその日どのフィルターを使うかが決まる。したがって「既知」のTNOsすべてがすべてのバンドで均等に観測されているわけではない。またTNOsの自転による光度変化の影響を正確に取り除けるほど、密なデータセットはないので、この研究で求めたカラーの誤差はTNOのカラー測定専用の観測で得られる値より多少大きいかもしれない。それでも以下に述べるようにカラーと軌道分布の間に明確な相関を見つかることができた。

さまざまなカラーの組み合わせで各力学グループのカラー分布を調べたところ、 $g-i$ で最もよくカラーと軌道の相関が見られた。Low-I天体のカラー分布の中心は太陽カラーより明らかに赤く、High-Iグループでは太陽と同じようなカラーか

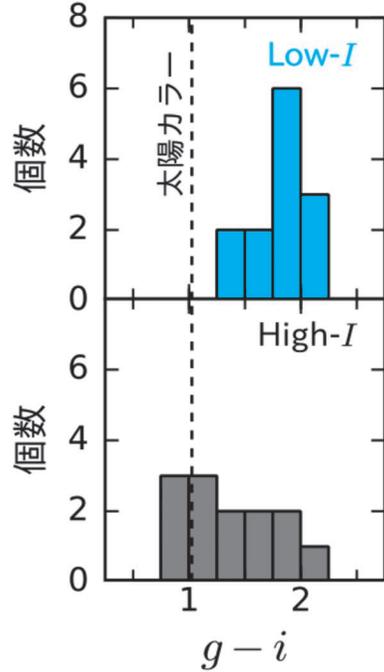


図3 I が6度以下と6度より大きいTNOsの $g-i$ カラー分布。

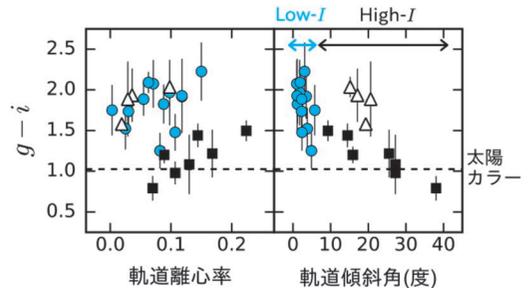


図4 Low-I (青丸)とHigh-I (四角と三角)の $g-i$ カラー、 e , I の関係。

らやや赤いところまでカラー分布が広がっていた(図3)。 I が小さいTNOsが赤いことは先行研究でも報告されており、今回は先行研究の結果を確認する結果となった。

さらに、Low-IとHigh-Iの $g-i$ カラー、 e , I の関係を調べてみると、High-Iで赤い($g-i > 1.0$)天体(図4で三角)は e が小さく、かつ、 I が20度付近に集まっていることがわかった。このこと

より High-I TNOs には e とカラーで区別される二つのグループが存在することが示唆される。

この研究は 30 個の既知の TNOs のカラーに基づいているが、HSC サーベイはまだ続くので、今後さらにサンプル数は増える。また新発見の TNOs の軌道を決定し、より多くの TNOs で軌道とカラーの関係を探ることで、上記の High-I 中の二つのグループの起源や TNO 全体が経験した力学進化を推定できると期待される。

2.2 ケンタウルス族のカラー測定²⁾

神戸大学の概圭史氏のグループは寺居氏、筆者と協力し、HSC サーベイ開始直後から積極的に HSC サーベイデータを用いた研究に取り掛かった。ケンタウルス族のカラー測定の論文はこの研究グループの学生だった佐久川通さんの修士論文となった。

ケンタウルス族は木星と海王星軌道の間公転軌道をもつ天体の総称で、現在約 400 個が見ついている (JPL データベースより)。これらの天体は木星や他の大惑星から重力摂動を受けて軌道が変化するため、力学的寿命は数百万年程度と言われている。一部のケンタウルス族天体では彗星活動が報告されている。短周期彗星と同じくケンタウルス族も TNOs が内側に軌道進化したものと考えられており、この考えが正しいならばケンタウルス族は外側 (TNO 領域) からやってきた天体ということになるが、どの力学グループの TNOs がケンタウルス族に軌道進化するのか？ 特定の力学グループからの寄与が顕著なのか？ あるいはどの力学グループも同様にケンタウルス族に進化するのか？ などはまだ解明されていない。そこでケンタウルス族のカラー分布を TNO の各力学グループのカラー分布と比較してケンタウルスの起源を探ろうと考えたのがこの研究である。

この研究では HSC サーベイと HSC のアーカイブデータを使い、9 個の既知のケンタウルス族天体を見つけ (図 5)、それらの $g-i$ を測定して得たケンタウルス族のカラー分布を TNO のカラー

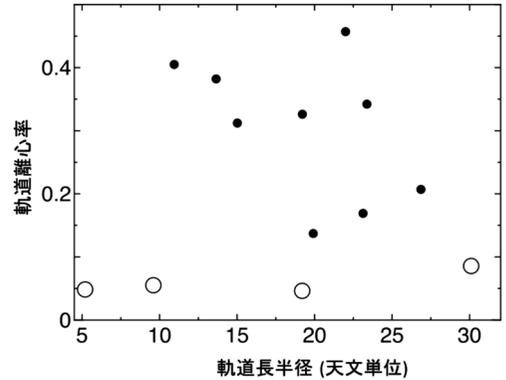


図5 検出した9個のケンタウルス族の軌道分布. 黒丸がケンタウルス族. 白丸はそれぞれ木星, 土星, 天王星, 海王星を表す.

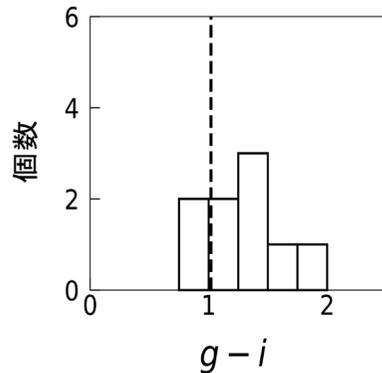


図6 9個のケンタウルス族の $g-i$ 分布. 破線は太陽カラーを示す.

分布と比較した。

ケンタウルス族の $g-i$ カラー分布 (図 6) を前節で述べた TNOs の $g-i$ カラー分布 (図 3) と比較すると、ケンタウルス族は High-I TNOs とカラー分布が似ていることがわかる。このことから、High-I TNOs が何らかの原因 (おそらく惑星の摂動) で内側に移動してケンタウルス族になる可能性が高いと言える。

また、同サンプルでカラーと軌道要素の関係を調べたが (図 7)、有意な相関は見られなかった。ケンタウルス族の力学的寿命は短く、それらの現在の軌道は天体の形成場所とは異なるので、軌道

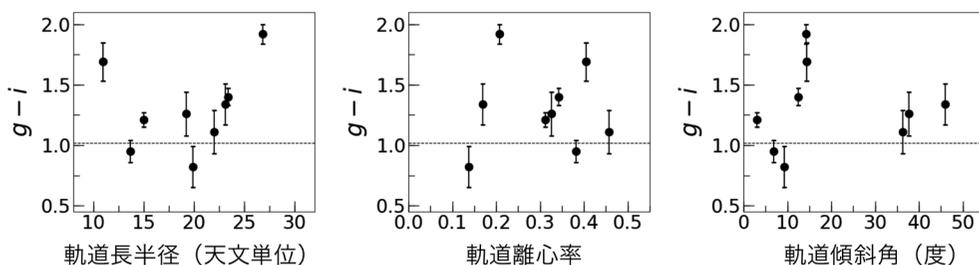


図7 9個のケンタウルス族 $g-i$ カラーと軌道要素の関係.

要素とカラーに相関がないのは自然だろう。

HSCサーベイはまだ続くので、ケンタウルス族のサンプル数が増える可能性は十分ある。ケンタウルス族の中に環を持つものが発見されている。巨大惑星と近接遭遇した際にこうした環が形成されるという研究もある。今後カラー分布を含む観測データが蓄積されれば、力学進化と環の形成の関連に対する制約も得られるかもしれない。ケンタウルス族とそれらより内側にある木星トロヤ群小惑星とのカラー分布の比較も面白いだろう。木星トロヤ群とTNOsは若干カラー分布が異なることが知られているため、ケンタウルス族が外側から来た天体なのか、内側のトロヤ群から散乱された天体なのか判定できるかもしれない。

2.3 機械学習で移動天体とゴミを仕分ける³⁾

HSCのサーベイのデータは膨大である。そして1枚1枚のHSC画像には膨大な数の光源が含まれている。光源の種類はさまざま、恒星、銀河、太陽系天体、宇宙線、明るい星周辺のピクセルから溢れ出た光、迷光、ゴミなどが混じっている。太陽系小天体を探すにはこうした光源の中から移動している天体を探し、撮像された時刻と、移動速度、明るさ等を使って論理的に同一の天体と判定できる移動する光源のセットを見つけていかなければならない。筆者がSuprime-Camでサーベイを始めた頃は人間の目や手作業で試行錯誤しながら移動天体を探したが、HSCサーベイの膨大なデータ量を前にしてはソフトウェアによる自動検出なしには到底処理しきれない。

こうしたビッグデータを扱う際に最近よく聞かれるのが「機械学習」という言葉である。機械学習は、データの検証作業において人間の介入を低減するために、データ解析手段として最近よく取り入れられている（例えば、Pan-STARRS1, PTF/iPTF サーベイなど）。

台湾の国立中央大学天文研究所のHsing-Wen Lin氏（現ミシガン大学）らはこの機械学習法をHSCサーベイにおける太陽系小天体探しに取り入れた。HSCサーベイの画像処理パイプライン(hscPipe)は光源の素性の指標として検出光源にいろんなフラグを付けてくれる。この研究ではこのフラグを使って機械学習ベースのreal-bogusシステムの確立を目指した。うまくいけば誤検出を少なくすることができ、解析にかかる時間短縮を図ることができる。リアルな天体と偽の天体を系統的に区別する訓練をするためにhscPipeの光源カタログから選び出した47個の光源の測光測定値と形状モーメントを使用していくつか実験を行ない、天体のどのような測光測定値と形状モーメントが誤検出を効果的に除去するために有効であるかを突き止めた(図8)。

この研究は機械学習でリアルな天体と偽の天体を効率的に判断する有効なパラメータを見つけたに過ぎない。機械学習でまだうまく分類できない光源もあり(図9)、機械学習の移動天体検出への適用はまだ開発途上である。

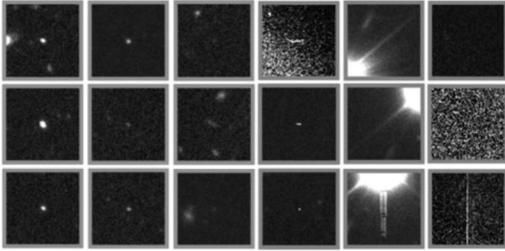


図8 機械学習システムにより識別されたリアルな天体(左3列)と偽の天体(右3列). 個々のイメージのサイズは, 約 $17'' \times 17''$.

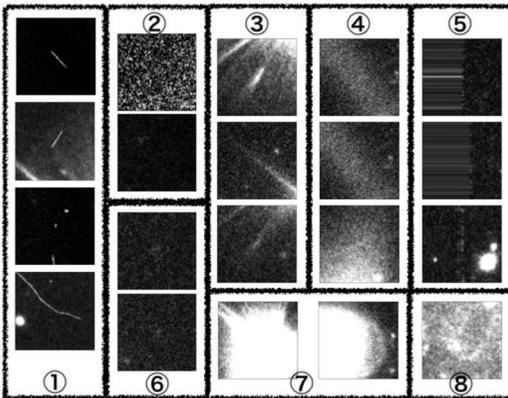


図9 機械学習システムが偽の天体と識別したが, “bad flags”を立てなかった例. 左列から①宇宙線, ②不検出, ③明るい星のスパイク, ④迷光, ⑤シフトして重ね合わせたときに生成されたピクセル, ⑥かすかでぼやけた光源, ⑦サチレーションした光源, ⑧星が多い視野にぼやけた天体がある場合. 機械学習で取り除けなかったこれらの誤検出は移動速度を利用して移動天体を判断するときに取り除かれることになる.

2.4 機械学習のHSCサーベイデータへの適用試験—移動天体検出からカラー・サイズ分布の測定まで⁴⁾

台湾の中央研究院天文及天文物理学研究所(ASIAA)のYing-Tung Chen氏らは2014年3月から2015年11月までにHSCサーベイで取得されたデータで, 同一視野が複数回撮像されているデータセットを探し(図10), TNOs探しを行なっ

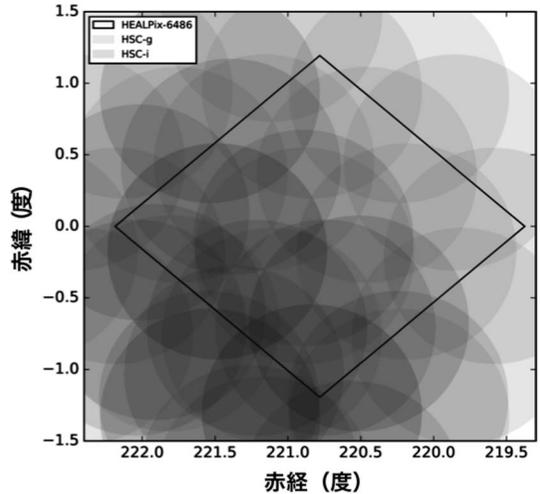


図10 HSCサーベイで捜たされた領域の一部. 移動天体の検出には異なる時刻に取られた複数枚の画像が必要なので, サーベイされた領域で, 重なった部分(色の濃いほど何度も撮像された領域)だけを選んでTNO探しを行う.

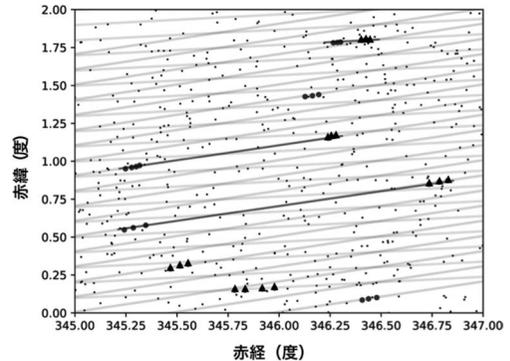


図11 二晩にわたって検出されたTNOをつないでいく. ▲が一晩目に検出された天体で, ●が二晩目に検出された天体. 一晩目から伸びる直線上に●の点群があり, それがTNOsの移動速度と整合的であれば, TNOsと判断する.

た. この際, 2.3節で述べた機械学習システムを適用し, リアルな天体を絞り込んでいった. 作成したTNO候補のリストから図11のように直線状に移動している点を見つけ, かつそれらの移動速度がTNOの速度範囲にある天体を抽出する. 最後にTNOとして抽出した天体の写っている位置

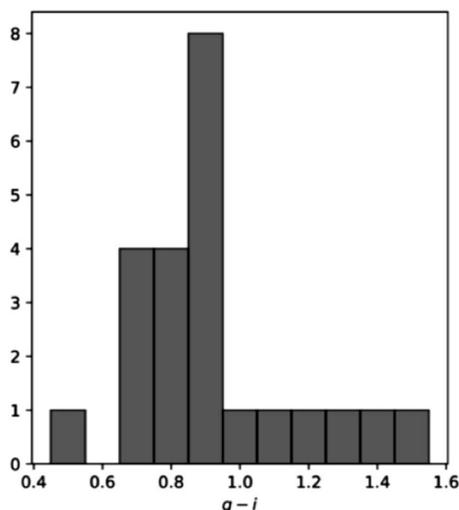


図12 HSCサーベイで発見されたIの大きい23個のTNOsの $g-i$ 分布.

のHSC画像を切り出してきて、人間の目で本物の天体かどうか再確認した。

この研究では231個の新しいTNOs/ケンタウルス族を発見している。観測期間が短いので、正確な軌道決定には至らないが、軌道傾斜角(I)の大きいTNOsとIの小さいTNOsには分けることができた。発見されたすべてのTNOsで g, r, i のカラーデータがそろっているわけではない。この研究では116個のIの大きいTNOsの $g-r$ 分布と23個のIの大きいTNOsの $g-i$ 分布を求めることができた。Iが大きいTNOs限定なのは、HSCサーベイの領域が黄道面から離れている領域が多いため、Iの小さいTNOsはめったに発見されないからである。TNOsの $g-i$ カラー分布についてはWong & Brown⁵⁾の先行研究がある。Chen氏らの見つけたIの大きいTNOsの $g-i$ カラー分布(図12)では0.9にピークがあった。このピークはWong & Brown⁵⁾が測定したTNOの $g-i$ カラーのbimodalな分布の青いほうのピークと一致している。

HSCサーベイが進行するにつれて観測領域の重複面積も増えていくので、今後もTNOsの検出

を続けて、 $g-r, g-i$ 以外のカラーでもカラー分布を調べてみると良い。同様の方法でTNO天体以外の検出(例えばメインベルト小惑星など)も行い、カラー分布を調べることができるだろう。

また、HSCサーベイ全体で数年にわたって検出されている同一のTNOがあれば、そのTNOの軌道はかなり精度良く求められ、どの力学グループに属しているかがわかる。そうすれば、OSSOSが行なったように軌道要素とカラー分布の関係をより小さいTNOsについて詳細に調べることができるようになるだろう。

3. 第9惑星を探せ!

2016年1月16日、カルフォルニア工科大学のKonstantin Batygin氏とMike Brown氏が海王星のはるか向こうに第9番目の惑星があるかもしれないという論文を発表した⁶⁾。Mike Brown氏は冥王星より多少大きいかもしれない太陽系外縁天体「エリス」を見つけて「惑星」の定義を見直すきっかけを作った人物である(結局冥王星は惑星から外れることになった)。彼らは現在軌道のわかっているDetached(2.1節で定義)の軌道分布に偏りが見られることから、この偏りを作り出した大きな天体が外縁部にいるのではないかと考えた。彼らの発表はセンセーショナルで、理論家や観測者たちの興味を大いに引きつけ、彼らの論文発表後、矢継ぎ早に第9惑星に関する論文がastro-phに発表されていった⁷⁾⁻²²⁾など。数カ月のうちに発表された論文数は数十本にも及び、ちょっとした大騒ぎだった。これらの論文で第9惑星の存在を否定したものはなかった。

筆者は2016年2月5日(発表から数週間後)にMike Brown氏から突然メールを受け取った。この業界では知らない人がいない有名な研究者で、第9惑星の件でますます衆目を集めている人物から何事か? とメールを読んでみると、すばる望遠鏡のHSCで第9惑星のサーベイをやりたいが、Keckとすばるの交換時間が少ないので、なかなか

か観測時間が取れない。すばると協力して第9惑星探しをする手立てはないだろうか？ 要約するとこのような主旨のことがたいへん丁寧に書かれていた。最初に書いたようにすばる望遠鏡とHSCは太陽系小天体を効率的に見つけることのできる世界最高の観測装置である。第9惑星探しも当然すばる望遠鏡+HSCで行うべきだろう。メールをもらってからすぐにハワイ観測所の高遠徳尚氏や寺居剛氏に相談したが、ハワイ観測所としては所長時間を第9惑星探しキャンペーンに費やすつもりはないという返事を当時のハワイ観測所長からもらったということだった。ということは、Brown氏に協力するなら自分たちで観測時間を確保しなければならない。第9惑星探しはタイムリーな話題だが、発見できなければそれで終わりという甚だリスクな観測課題である。単独でプロポーザルを出してもすばるの時間が確保できる保証はない。そこでほかにも協力者を集めることにした。変光星や爆発直後で大きく光度変化する超新星を見つけるために数日間のうちに何度も同視野を撮像する観測をHSCを使ってやりたい人たちがいた。彼らと協力すれば同じプロポーザルに第9惑星以外のサイエンスも盛り込めるのではないかと考えた次第である。そんなtime domain astronomy分野の研究を推進する一人であるIPMUの高田昌広氏に第9惑星サーベイの話を持ちかけたらすぐにポジティブな返信をいただいた。高田氏のおかげで、変光星RR-Lyraeを使って天の川銀河の広がりや測定するグループや、超新星のショックブレイクアウトの検出を目指すグループも第9惑星探しのプロポーザルに参加してください、一気に大きな観測グループができあがった。第9惑星以外にTNOサーベイとしても機能するため、他の太陽系研究者に取っても有益なデータが得られるはずである。こうしてMike Brown氏のメールを受け取ってからわずか4日後、

日本で観測チームが作れそうだということを伝え、彼らと一緒にプロポーザルを書くことになった。

インテンシブプロポーザルは通らなかったが、ノーマルプロポーザルは受理され、2016年秋と2017年と2018年秋-冬に時間をいただいた。Batygin & Brown⁶⁾, Brown & Batygin¹³⁾の見積もりでは、第9惑星の軌道は黄道面から傾いた離心率の大きな楕円軌道をしている(公転周期: 約15,000年, 近日点距離: 約200 au, 軌道長半径: 約700 au, 軌道離心率: 約0.6, 軌道傾斜角: 約30度)と予想される。彼らはこの惑星の質量を地球の10倍程度と見積もった*5。周知のようにこれまでのサーベイ観測ではこのような天体は見つかっていない。サーベイの限界等級から考えると、第9惑星の明るさの上限は24-25等程度と推察されるが、Brown氏とBatygin氏は遠日点における第9惑星の明るさを22-25等(Vバンド)と仮定した¹³⁾。彼らの論理はこうである。「第9惑星が地球質量の10倍ほどの氷天体で、もしそれが現在近日点付近にいるならば、これまでに実施された全天サーベイで発見されているはずである。しかし実際には、第9惑星は発見されていない。ということは、第9惑星は近日点付近にはおらず、現在は遠日点付近にいるに違いない。」このような推論のもと、BrownとBatygin両氏がはじき出した約800平方度の領域のサーベイをわれわれは互いに協力しながら行っている(Brown氏らはKeck-すばる時間交換枠から、われわれはすばる枠から観測プロポーザルを出している)。最初の第9惑星サーベイは2016年9月で、2017年は悪天候に泣かされたが、2018年1月までに200平方度近くのサーベイを完了し、現在も絶賛継続中である(この原稿が出版される頃にはもしかしたら800平方度掃き終えているかもしれない)。まだ第9惑星の候補天体の発見には至っていない

*5 第9惑星の軌道パラメータや予想質量は新しいDetachedの発見等で少しずつ修正されている。

が、200平方度のサーベイデータでは約300個！ものTNOの検出（多くは新発見のTNOである）に成功している。このペースでTNOsの発見が続けば、現在のTNOカタログ（現在数千個が登録されている）への登録数を大幅に増やすことができるだろう。

第9惑星探しをしているのはわれわれとMike Brown氏のグループだけではない。Scott Sheppard氏（Carnegie Institution for Science）とChadwick Trujillo氏（Gemini Observatory）はすばる望遠鏡やGemini望遠鏡の時間ばかりでなく、ハワイ大学のグループとも協力して太陽系外縁部天体サーベイを精力的に行っている。彼らはわれわれより早くから太陽系外縁天体のサーベイに着手しており、着実に遠方天体の発見を続けている。すばる望遠鏡のスケジュールを見ると、S18Bはわれわれ、Brown & Batygin, Sheppard & Trujilloのグループで13夜が太陽系外縁部天体探しに費やされた。晴天に恵まれ、装置トラブルもなければわれわれとBrown氏のグループで、Batygin & Brown⁶⁾が最初に予想した約800平方度の残りの部分のサーベイをほぼ完了できるだろう。Sheppard & Trujilloのグループはすばる望遠鏡以外にもチリのBlanco望遠鏡やマゼラン望遠鏡を使っている。ダークエナジーサーベイ（DES）のデータを利用して第9惑星検出を狙っている第3のグループもいる。

果たして第9惑星は見つかるだろうか？「第9惑星がいると思ってサーベイを進めているが、もしこのまま見つからなかったら、第9惑星が存在しないことはどうやって判断すればよいのか？」とBrown氏にたずねてみた。Brown氏の答えはすぐに返ってきた。「それは簡単だ。Detachedの軌道分布に偏りが無いことを示せばいい」。第9惑星は、現在発見されている10個程度のDetachedの軌道分布に基づいて予想されている。サーベイで多くのDetachedが見つかってくれば、それらの軌道分布に偏りがあるかないかが明確になってくるだろう。つまり、第9惑星の存在を確かめるに

も否定するにもサーベイを進めるしかないのだ。

4. まとめ

本稿では、これまでに得られたHSCサーベイのデータを使った四つの論文を紹介したが、HSCサーベイはまだ終わっていない。さらに多くの太陽系小天体の検出が見込まれる。第1章で述べた科学目標のうち、現在のHSCサーベイデータで実現可能にもかかわらず、まだ取り組めていないテーマもある。今後さらに解析を進めていくつもりである。HSCサーベイのデータは日本の全ての研究者がアクセス可能なので、是非とも多くの人に知ってもらい、ともに研究成果を出したいものである。たいそうな研究テーマを掲げなくとも、画像を見て彗星を探したり、小惑星を探して小惑星センター（Minor Planet Center (MPC)）に報告し、発見者になることも可能である（現在放送大学の研究グループと協力して移動天体探しを行っている）。このようなことを自分でやるには配布されるデータの構造を理解しないとイケないので、容易な仕事というわけではない。そのうち一般の人も楽しんで天体探しができるような仕組みを考えたいとは思っている。

HSCサーベイでは検出・同定されている小天体の数は比較的少ない。これは先に述べたように観測ケーデンスが太陽系小天体に適していないからである。HSCサーベイと並行して太陽系天体検出に最適なケーデンスで行ったわれわれの小規模サーベイでは、もっと多くの太陽系小天体を一度に検出できた。一晩の観測で木星トロヤ群631個、ヒルダ群130個を検出し、各群の最も小さいサイズの天体のサイズ分布を推定した^{23), 24)}。これらのサイズ分布は、太陽系進化過程を探るために使用された²⁵⁾。また、第9惑星探しで2016年9月に取得したデータから188個のTNOを検出し、そのサイズ分布を調べた²⁶⁾。第9惑星探しのデータ解析は今も進行中なので、今後もっと多くのTNOの検出が見込める。将来的にはTNOの力学グルー

のごとにサイズ分布の調査が可能になるだろう。

HSCは今まで観測効率が悪くサーベイがなかなか進まなかった太陽系外縁部天体を確実に検出し、大口径望遠鏡でようやく見えるような微小天体の特性を明らかにしつつある。HSCが太陽系全体の進化史を描き出すのはもうすぐかもしれない。

謝 辞

HSCが共同利用で活躍し始めて約4年、さまざまな研究成果が出てきました。太陽系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、HSCの太陽系分野の研究への貢献度はますます大きなものになるでしょう。HSCの開発者の皆さん、HSCサーベイに関わるすべての皆さんに感謝いたします。本稿の2.1, 2.2節の図はPASJ論文に掲載された図をそれぞれ主著者の寺居剛さんと佐久川遙さんに天文月報用に改定していただきました。ありがとうございました。

参考文献

- 1) Terai, T., et al., 2018, PASJ, 70, S40
- 2) Sakugawa, H., et al., 2018, PASJ, 70, 116
- 3) Lin, H.-W., et al., 2018, PASJ, 70, S39
- 4) Chen, Y.-T., et al., 2018, PASJ, 70, S38
- 5) Wong, I., & Brown, M. E., 2017, AJ, 153, 145
- 6) Batygin, K., & Brown, M. E., 2016, AJ, 151, 22
- 7) Iorio, L., 2017, Ap&SS, 362, 11
- 8) Cowan, N. B., et al., 2016, ApJL, 822, L2
- 9) Linder, E. F., & Mordasini, C., 2016, A&A, 589, A134
- 10) Fienga, A., et al., 2016, A&A, 587, L8
- 11) Malhotra, R., et al., 2016, ApJL, 824, L22
- 12) Ginzburg, S., et al., 2016, ApJL, 822, L11
- 13) Brown, M. E., & Batygin, K., 2016, ApJL, 824, L23
- 14) Mustill, A. J., et al., 2016, MNRAS, 460, L109
- 15) Kenyon, S. J., & Bromley, B. C., 2016, ApJ, 825, 33
- 16) Bromley, B. C., & Kenyon, S. J., 2016, ApJ, 826, 64
- 17) Holman, M. J., & Payne, M. J., 2016, AJ, 152, 80
- 18) de la Fuente Marcos, C., & de la Fuente Marcos, R., 2016, MNRAS, 462, 1972
- 19) Witze, A., 2016, Nature, 531, 290
- 20) Paučo, R., & Klačka, J., 2016, A&A, 589, A63
- 21) Holman, M. J., & Payne, M. J., 2016, AJ, 152, 94
- 22) Raymond, S. N., et al., 2016, MNRAS, 458, 2962
- 23) Yoshida, F., & Terai, T., 2017, AJ, 154, 71
- 24) Terai, T., & Yoshida, F., 2018, AJ, 156, 30
- 25) Yoshida, F., et al., 2018, PSS, in press
- 26) 寺居剛, 吉田二美, P9/RRRサーベイプロジェクト, 「Planet Nine サーベイの進行状況とデータ解析」日本天文学会2018年秋季年会

Solar System Science Challenging with Hyper Suprime-Cam

Fumi YOSHIDA

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

Abstract: “Subaru Strategic program—HSC Survey” (hereinafter HSC Survey) is the survey observation with the Hyper Suprime-Cam (HSC) having a field of view of about 1.5 square degrees. It will survey the sky of approximately 1400 square degrees in total with the 5 broad bands, and a part of the area with several narrow bands. It uses 300 nights of the Subaru Telescope in 5 years from March 2014. By utilizing the light-gathering power of the large aperture of the Subaru telescope and the wide field of view of HSC, it is possible to detect efficiently fainter small solar system bodies than any other previous surveys. Since the introduction of HSC, the efficiency of the statistical research of the small solar system bodies was greatly improved. Here we introduce four papers which we have done so far using the data of the HSC survey. Three of them were published in the special issue: SUB-ARU HYPER SUPRIME-CAM SURVEY in PASJ.^{1), 3), 4)} The remaining one (color measurement of the Centaurs) was also published in PASJ recently. Finally, I would like to mention about our global competition that we were involved by an unprecedented survey capability of the HSC. It is the Planet Nine search.