

<参考資料> 学術発表（1件）に関する詳細資料

COIAS で実現!市民による太陽系小天体の大規模検索

会見出席者：浦川聖太郎（日本スペースガード協会）、杉浦圭祐（三菱電機先端技術総合研究所）、伊東健一（東京大学）

共同研究者：大坪貴文（産業医科大学）、北里宏平（会津大学）、服部晃大（会津大学）、

小池美知太郎（国立天文台）、前田夏穂（神戸大学）、宇野慎介（東京大学）、

白田-佐藤功美子（国立天文台）、木下大輔（台湾国立中央大学）、関口朋彦（北海道教育大学）

研究成果のポイント

1. すばる望遠鏡の公開画像を用いて、未発見のものを含む太陽系小天体の検索（検出・測定・報告）を、ウェブブラウザ経由で手軽に行うことができるアプリケーション「COIAS(コイアス: Come On! Impacting ASteroids)」を開発
2. 900名以上のユーザーが利用。7万を超える新天体候補を MPC（小惑星センター）へ報告。このうち45天体については仮符号を取得。6つは太陽系外縁天体(2024/2/13時点)
3. 報告天体の明るさは24等級前後であり、世界で最も深い（暗い）レベルの太陽系小天体サーベイ観測結果。直径数百m程度の小さな小惑星の軌道解明に貢献できるものと期待

概要

1. すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ HSC（ハイパー・シュプリーム・カム）を用いて、のべ330夜にわたる大規模なサーベイ観測が実施されました。観測画像は公開されており、その中には未発見のものを含む大量の太陽系小天体（小惑星・彗星・太陽系外縁天体）が撮像されています。しかしながら、画像の多さと太陽系小天体の測定を行う手順の煩雑さゆえ、これらの天体を効率的に検索できていませんでした。この問題を解決するため、ウェブブラウザ経由で手軽に太陽系小天体の検索が行えるアプリケーション「COIAS」を開発しました。
2. COIASの特徴は、研究者でない一般の方が、すばる望遠鏡の画像を用いて太陽系小天体の検索をできる点にあります。このように、一般の方と協力する研究スタイルを「市民科

学* (=シチズンサイエンス)」と言います。これまで、900名以上のユーザーによって、7万を超える新天体候補の検索に成功し、その結果を MPC へ報告しました。このうち 45 天体については追観測に成功し仮符号を取得、6 つは太陽系外縁天体でした(2024/2/13 時点)。

3. 世界各地で太陽系小天体のサーベイ観測が実施されています。これは、太陽系小天体の軌道解明を行うとともに、地球に近づく小惑星や彗星を発見・監視する活動(プラネタリーディフェンス)を目的としたものです。本研究で報告した天体の明るさは 24 等級前後であり、世界で最も深い(暗い)レベルでの太陽系小天体サーベイ観測の成果といえます。これまで詳しくわかっていなかった、直径数百 m 程度の小さな小惑星の軌道解明に貢献できるものと期待されます。未解析データは残っており、太陽系外縁天体、活動的小惑星といった珍しい天体の検出も引き続き期待できます。報告した天体の多くは追観測を待っている状態です。将来の追観測によって、今後、より多くの天体に対して仮符号を取得できるものと考えています。

本文

1. 背景・太陽系小天体搜索のこれまでとこれから

未知の天体を探すことは、観測天文学における古くからの主要な研究テーマとなっています。太陽系科学に目を向けると、1801年に初めて小惑星(1)ケレスが発見されて以来、現在までに130万を超える小惑星が発見**されています。また、1992年の太陽系外縁天体 1992 QB₁=(15760)アルビオンの発見をきっかけに、海王星より遠くに多くの小天体が存在することも観測的に明らかになりました。2018年には太陽系外からやってきたと考えられる恒星間天体の発見もありました。このように、太陽系内外の小天体の発見と共に、人類が持つ太陽系に対する理解や認識が変貌していています。また、こうした発見が続く中で小惑星や彗星の中に地球に接近し衝突する危険性を含むもの(地球接近天体)が存在することも明らかになりました。地球接近天体を発見し、その軌道を正確に知ることは、プラネタリーディフェンスと呼ばれる天体の地球衝突問題に取り組む活動の一環であり、国連宇宙平和利用委員会(COPUOS)においても、積極的に行うことが提言されています。こうしたことを背景に世界各地で様々な太陽系小天体(小惑星・彗星・太陽系外縁天体)のサーベイ観測が実施されています。代表的なサーベイプロジェクトとしてパンスターズ(ハワイ・1.8m望遠鏡)、カタリナスカイサーベイ(アリゾナ・1.5m望遠鏡など)、アトラス(ハワイ・0.5m望遠鏡)などがあげられます。宇宙では、赤外線天文衛星ネオウィズによる観測も実施されています。これらの観測によって、22等級前後の太陽系小天体が発見され、その軌道分布が明らかになってきました。最近では、ディーカムサーベイ(チリ・4.0m望遠鏡)が実施さ

れ、建設中のベラ・C・ルービン天文台(チリ、8.4m 望遠鏡)でも近い将来に観測がはじまる予定です。これらの観測で、さらに暗い太陽系小天体が数多く発見され、太陽系の理解が深まることが期待されます。

2. 研究手法：すばる望遠鏡 HSC と COIAS

HSC (ハイパー・シュプリーム・カム) は、すばる望遠鏡に導入された超広視野主焦点カメラです(図1)。HSC を用いた大規模サーベイ観測(ハイパー・シュプリーム・カムすばる戦略枠プログラム。HSC-SSP)が2014年から2022年まで実施されました。観測画像は公開されており、その中には未発見のものを含む大量の太陽系小天体が撮像されています。

HSC の画像を用いれば、これまで発見されていなかった暗い太陽系小天体を大量に発見することが期待できます。しかしながら、100TB を超える画像の多さと太陽系小天体の測定を行う手順の煩雑さゆえ、これらの天体を効率的に検索(検出・測定・報告)することができていませんでした。そこで我々の研究グループでは太陽系小天体検索アプリケーション

COIAS (コイアス:Come On! Impacting

ASteroids)を開発しました。COIAS では大量の画像を検索する方法としてシチズンサイエンスの力を

用いることにしました。シチズンサイエンス(特に天文分野では市民天文学)とは、研究者でない市民の方と共に行う研究スタイルです。多くの方に、研究に参加していただくことで大量の画像から太陽系小天体を検索することが可能となります。また、市民の方に対して科学に興味をもっていただく機会の創出にもなります。一方で、市民の方と協力して検索を行うには、コマンドライン入力やインストールの必要のない、誰もが扱いやすいデータ解析用のアプリケーションが必要となります。

COIAS は、Chrome などのブラウザを用いて操作ができるウェブアプリケーション***です(図2)。市民(ユーザー)の方は、COIAS のウェブページにアクセスし、ユーザー登録を行えば COIAS を使うことができます。COIAS のサーバーには、HSC-SSP の公開データの中から太陽系小天体検索に適した画像のみを保存しています。ユーザーの方は、COIAS のウェブページにアクセスすることで、HSC-SSP の画像を扱うことができます。太陽系小天体は、遠くの恒星と比較して、時間と共にその位置(座標)が移動していきます。従って、COIAS で太陽系小天体を探すには、時間をおいて同じ領域を撮像した画像の中から一定の大きさと速度で動いている天体を探すこととなります。COIAS では、そのような天体を自



図1:ハイパー・シュプリーム・カム
(画像クレジット国立天文台)

動的に検出し、位置と明るさを測定することができます。ただし、検出した信号にはノイズも含まれているので、ユーザーの方に本物の太陽系小天体とノイズをクリック操作で見分けてもらうこととなります。ユーザーの方に本物と認定された太陽系小天体の位置と明るさの情報は専用の報告フォーマットに自動的に変換され、その結果を COIAS から MPC (マイナープラネットセンター) へ報告することができます。報告の際に、ユーザーの方は測定者としてその名前が記録され、将来、発見した天体に名前を提案する権利が得られる可能性があります。



図 2(上) : COIAS の操作画面の一例。太陽系小天体候補が黒い四角印で囲まれる。ユーザーはここから本物の太陽系小天体を認定する。図 2(中) : 新天体候補の検出例。左上→右上→左下→右下の順に時間が経過している。黒い四角印は時間の経過と共に背景の恒星に対して移動している。図 2(下) : MPC への報告フォーマットの作成画面 (英語版画面)

3. COIAS で実現！市民による太陽系小天体の大規模検索

COIAS は 2023 年 7 月 31 日に一般公開を開始しました。一時的にサービスを停止する期間もありましたが、これまで、900 名以上のユーザーによって、10 万を超える太陽系小天体の測定結果を MPC へ報告しました。COIAS は英語対応しているため、ユーザーは日本国内だけでなく海外にも広まっています。報告天体のうち、約 21000 が確定番号天体、約 15000 が仮符号天体、約 70000 が新天体候補の測定データとなっています(2024/2/13 時点)。市民の方によって、これほど多くの測定データを報告した例はなく、COIAS によって太陽系小天体の大規模検索が実現したこととなります。確定番号天体と仮符号天体は既知の天体ですが、測定データはその天体の軌道精度の向上に寄与します。太陽系小天体が仮符号を取得するには、複数日以上での観測データが必要となります。HSC-SSP では必ずしも同じ領域を複数日以上にわたって観測していません。そのため、新天体候補の多くは一夜の観測のみの報告です。このような天体は、MPC のデータベース上で ITF (Isolated Tracklet File) と分類され、他の観測所による追観測を待つ状態になります。あるいは、一部の COIAS の測定データは、他の観測所がすでに報告していた ITF の追観測データとなり、他の観測所の仮符号の取得に寄与することもあります。一方、複数日以上にわたり同一視野を観測したデータも存在しており、そうした観測から COIAS 単独での仮符号の取得に成功しています。これまで仮符号を取得した天体は 45 天体に上り、このうち 6 天体は太陽系外縁天体です。市民による太陽系外縁天体の仮符号の取得は世界的にも非常に珍しいものです。報告した天体の等級分布は図 3 のようになります。この図が示すように、測定天体の多くは 24 等級前後であり、中には 26.5 等級に迫る天体も報告されています。これは、世界で最も深い(暗い)レベルの太陽系小天体サーベイ観測の成果といえます。また、24 等級の小惑星を 2.5au に置いた場合、その直径は数百 m と推定されます。COIAS によって、これまでより小さい小惑星が発見できることを示す結果となりました。

COIAS測定天体の等級ヒストグラム

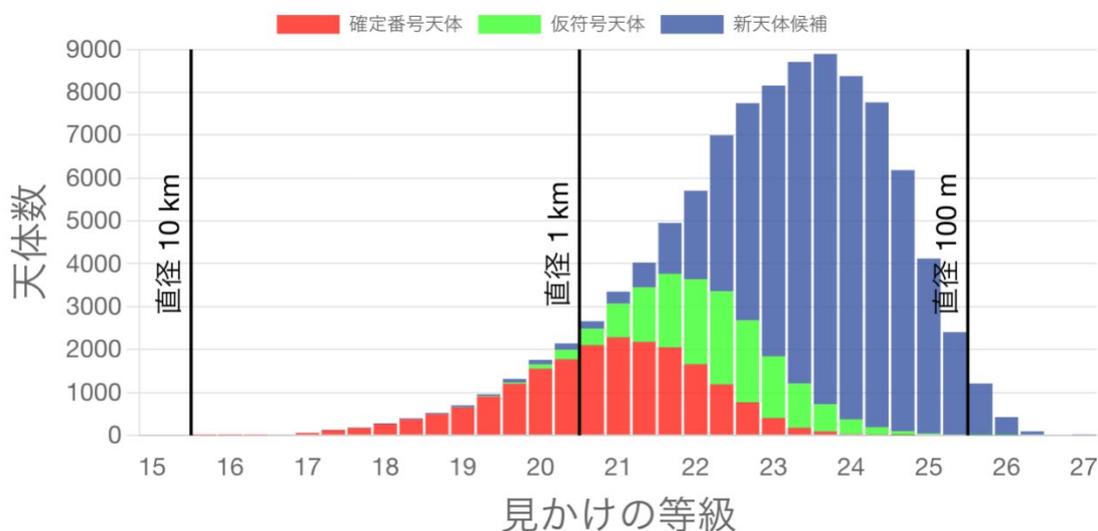


図3：MPCへ報告した太陽系小天体の等級分布（一部、誤検出やノイズも含む）。ヒストグラムに記載した直径は、小惑星を太陽からの距離を2.5 au、反射率0.15、位相角0度を仮定した場合の推定値。また、フィルターの違いは考慮していない。

4. 今後の期待と展望

COIASで報告した新天体候補は追観測を待っている状態です。ベラ・C・ルービン天文台の観測が始まれば、追観測がなされ仮符号の取得ができるのではないかと期待しています。特に、COIASで報告した小惑星の直径は数百m程度と推定されます。直径数百m程度の小惑星は「ヤルコフスキー効果」という熱的な影響を受けて、その軌道長半径を変化させます。これまでの小惑星の軌道分布は「ヤルコフスキー効果」の影響が少ない直径1km以上の小惑星から作られたものです。COIASとその追観測によって「直径数百m程度の小惑星がどのような軌道分布をしているのか?」「火星と木星の間のメインベルト小惑星帯から地球接近天体の領域へどのように小惑星が移動してくるのか?」といった、太陽系における物質輸送メカニズムの解明がなされるのではないかと期待しています。

また、HSC-SSPは多波長フィルターによるサーベイ観測です。COIASで仮符号を取得した天体の中には、複数のフィルターで観測されたものが含まれます。複数のフィルターで観測された天体は反射スペクトル分類から表面物質の推定が可能となります。COIASによって、どのような表面物質をもつ太陽系小天体がどのような軌道に存在しているのか解明できると思われます。

これまで、COIASでは小惑星（地球接近天体を含む）や太陽系外縁天体を検出していま

す。これらの天体以外にも、活動的小惑星と呼ばれる突発的な彗星活動を起こす小惑星が見つかるかもしれません。活動的小惑星は太陽系形成や生命の起源の鍵となる始原的物質を豊富に含むと考えられおり、将来の探査機による探査目標になるかもしれません。さらに、可能性は低いですが恒星間天体や第9惑星が撮像されているかもしれません。

現在の COIAS は、ハードディスク容量の制限から、すべての HSC-SSP のデータが解析対象となっていません。また、HSC-SSP のデータリリースは現在第3弾(PDR3)までとなっており、最終版となる第4弾の公開を待っている状態です。加えて、HSC-SSP 以外にも HSC で取得された公開データがあります。今後は、残りの公開データを COIAS に取り組むことで、さらに多くの太陽系小天体を発見できる環境を構築したいと考えています。

最後に、COIAS によって「誰もが」「簡単に」「最先端かつ本物の」天文研究に携わることが可能となりました。COIAS を使った研究体験を多くの方にしていただき、科学の裾野が広がることを強く願っています。

*特に天文学に関する市民科学の呼び名として国立天文台では「市民天文学」という言葉を提唱しています。

**本稿では仮符号を取得した段階で発見とします。

***ウェブアプリケーション開発にあたり、株式会社津ラボ様にご協力いただきました。

<用語解説など>

COIAS の名前について：COIAS(Come On! Impacting Asteroids)は、研究目的の一つであるプラネタリーディフェンス(スペースガード)を意識したのですが、その読みである「コイアス」は、高校生が小惑星の発見を目指す姿を描いた漫画・アニメ「恋する小惑星(アステロイド)」の略称に由来しています。名前の利用に加えアプリケーション中でのイラストの作成など原作者である Quro 先生、芳文社様、KADOKAWA 様に協力いただいています。

小惑星：多くは火星と木星の間に分布している岩石状の小天体。ただし、一部は地球に近づく軌道を持つものもあり、地球接近天体(NEO：near-Earth Object)と呼ばれる。

太陽系外縁天体：海王星の軌道長半径(30au)より大きな軌道長半径を持つ小天体。冥王星も太陽系外縁天体の一つであるが、1992 QB₁の発見当時、冥王星は惑星に分類されていたため、冥王星が準惑星となるまで1992 QB₁が最初の太陽系外縁天体という認識であった。

MPC (マイナープラネットセンター)：国際天文学連合(IAU)の下、世界中の天文台や観測所から集まる小惑星をはじめとする太陽系小天体の位置と明るさの情報を取りまとめている組織。

ITF (Isolated Tracklet File) : MPC に報告した新天体候補のうち追観測が実施されていないもの。

仮符号天体 : 複数日以上で追観測が実施され、おおよその軌道推定が実施された天体。1998 KY₂₆ のように、西暦とアルファベットと数字の組み合わせで表示される。

確定番号天体 : 仮符号のついた小惑星に対し十分な追観測が行われ、確かな軌道が得られるとその小惑星には通し番号がつけられる。この番号は確定番号と呼ばれ MPC によって決められる。

発見と命名 : 確定番号がついた時点で正式な発見となり、MPC によって発見者が決定される。発見者になると、その小惑星の名前を IAU(国際天文学連合)に提案する権利が得られる。

連絡先

浦川聖太郎 (日本スペースガード協会) urakawa@spaceguard.or.jp

COIAS で実現!市民による太陽系小天体の大規模検索

すでに参考資料をお送りしていますが、その後、本研究に関連して太陽系小天体の発見が相次ぎました。特に、地球接近天体の発見がありましたので第2報として最新(2024年2月25日現在)の研究成果をお送りします。この報告の通り、太陽系小天体の搜索分野では日々、天体の発見が継続的に行われています。

参考資料(前回)における天体発見数などの値

7万を超える新天体候補を MPC(小惑星センター)へ報告し、このうち45天体について仮符号を取得しました。45天体のうち6天体は太陽系外縁天体でした。(2024/2/13時点)

第2報による天体発見数などの値

7万5000を超える新天体候補を MPC(小惑星センター)へ報告し、このうち61天体について仮符号を取得しました。61天体のうちの1つは地球接近天体でした。COIASによる初めての地球接近天体の発見となります。また、8天体は太陽系外縁天体でした。このうち一つは、軌道長半径が79.9auという大きな軌道長半径を持つ天体でした(海王星の軌道長半径は30au)。

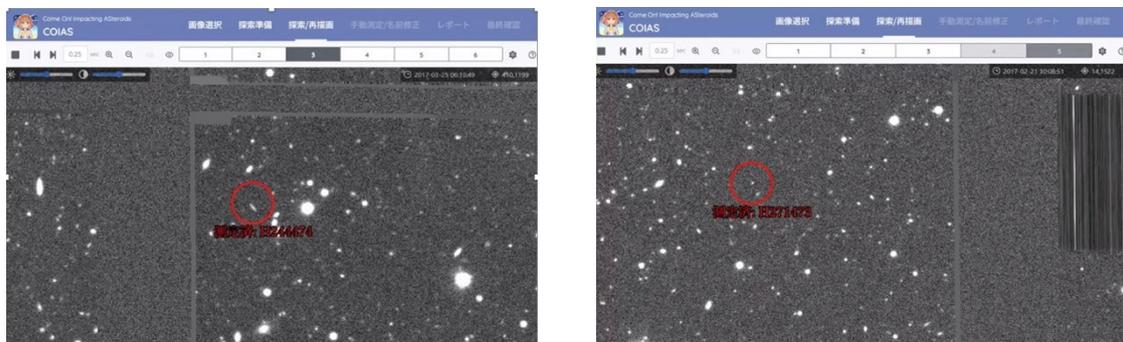


図4: (左) 地球接近天体 2017 FC₂₂₈ の画像。軌道長半径 1.71au, 軌道離心率 0.327, 軌道傾斜角 6.23°、22.9 等級前後。(右) 太陽系外縁天体 2017 DE₁₅₇ の画像。軌道長半径 79.9au, 軌道離心率 0.587, 軌道傾斜角 17.5°、23.8 等級前後。

COIAS測定天体の等級ヒストグラム

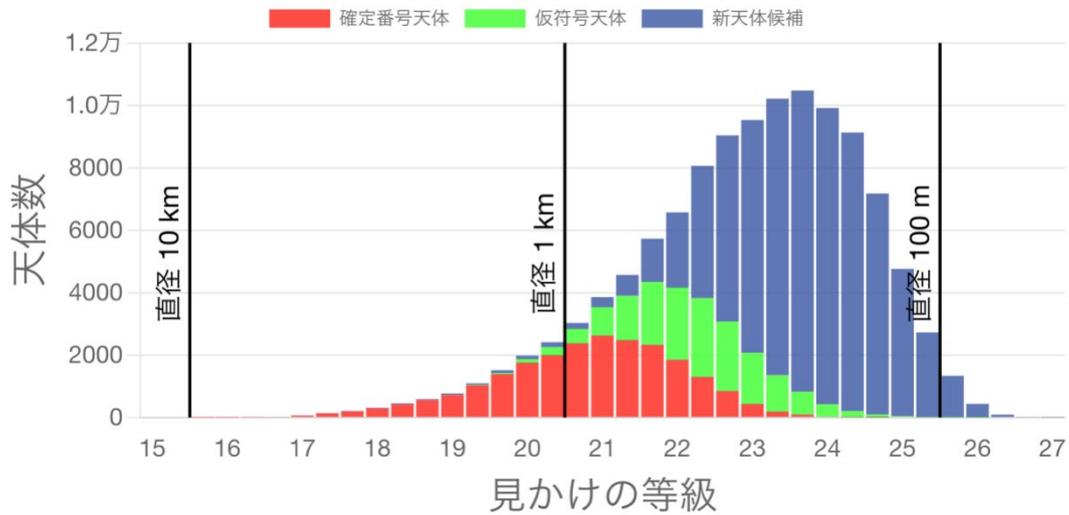


図 5：MPC へ報告した太陽系小天体の等級分布（2024 年 2 月 25 日現在のもの、一部、誤検出やノイズも含む）。ヒストグラムに記載した直径は、小惑星を太陽からの距離を 2.5 au、反射率 0.15、位相角 0 度を仮定した場合の推定値。また、フィルターの違いは考慮していない。

連絡先

浦川聖太郎（日本スペースガード協会） urakawa@spaceguard.or.jp