

ExoKyoto太陽系外惑星データベース開発について

山敷 庸亮¹

(要旨) ExoKyotoデータベースは、既存のデータベースとの相互比較参照モジュールや、トランジット法のみで確認されている惑星についての質量推定モジュール、Stellar画面を用いた系外主星・周辺恒星・メシエ天体等の表示や、Google Skyを用いた天球上での惑星系の位置表示などを有し、過去のデータベースを包括した上位互換的なデータベースとなっています。すでに発見されている系外惑星だけではなく、12万個以上の恒星データや、ケプラーフィールドの恒星群、さらには京都大学や国立天文台で発見されたフレア星や突発天体のリストを取り込んでおり、様々な定義のもとでのハビタブルゾーンの計算も行っています。本総説では、このデータベース開発の背景や仮定、用いられている考え方と、今後の活用、問題点などについて紹介します。

1. 背景

太陽系外惑星データベース、といっても、開発しようとした時点ですでに複数公開されており¹、今更わざわざつくる必要をそもそも疑問視されました。実は開発仲間でも、二番煎じのデータベースなどつくっても、労多くして、得るものは少ないだろう、というのが大勢でした。それでは、なにが、ExoKyotoをここまで突き進ませようという原動力であったのでしょうか？また、果たしてできたものは役に立っているのでしょうか？

筆者がそもそも自分でデータベースをつくってみようと思ったきっかけの一つは、太陽系外惑星のハビタビリティの議論が、ほとんど欧米主体であったことがあります。すでに2008年ごろから様々な欧米の科学番組で系外惑星特集が組まれていたのに、我が国ではほとんど話題にのぼることはありませんでした。中でもホットジュピターやハビタブル惑星に関しては、National GeographicやNaked Scienceやそれに類する欧米の番組が数多く出回っていたにもかかわらず、我が国の番組ではほとんど目にすることはありませんで

した。情報発信があってもそれは惑星科学専門家に限るもので、一般の人々への浸透は遅かったといえるでしょう。また、そのようなハビタブルな系外惑星の分類を、NASAを始めとする欧米の機関が独自で行っており、我々は彼らが<決めた>ハビタブルかどうか、という結果を疑いもなく追従するだけである、ということが、国単位での研究の遅れを感じさせました。さらにNASAは、Keplerなどで惑星を発見する際、独自のイラストを同時に公開し、それ以降その惑星の姿はNASAのイラストで固定される、という点に大きな問題意識を持ちました。まずはそれらを理解するために、当初、京都大学国際高等教育院で開講している学部生向けのILASセミナー(旧ポケットゼミ) ハビタブル・アースでExcelを用いてハビタブル判定を行い、すでに見つかった惑星に適用し、それを京都大学の宇宙生物学ゼミで「(式や判定結果が)あっている、あっていない」というような議論をする、ということをやっていました。それが我々の間でなかなか面白くなり、「それならデータベースを作ってみよう」とい

1. 京都大学 大学院総合生存学館
yamashiki.yosuke.3u@kyoto-u.ac.jp

1. Exoplanet Transit Database <http://var2astro.cz/ETD/>
The Extrasolar Planets Encyclopaedia <http://exoplanet.eu>
Open Exoplanet Catalogue
<http://www.openexoplanetcatalogue.com>

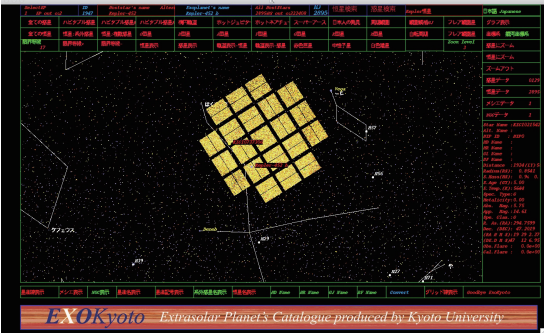


図1：Stellar Windowを用いて表示したKepler-452b，限界等級17等，ズームレベル3.

う話になりました。当初は、自分たちの「自己学習用」として作り出したのですが、まず佐々木貴教氏が「初めての日本語データベースをつくろう」と言い出しました。私は日本語で作る意味がさっぱりわからず、かつ日本語は面倒臭いので、できればやめたかったのですが、最終的に受け入れることとなり、日本語での「意義」がのちにわかるのでした。また、それから3ヶ月後、宇宙飛行士の土井隆雄氏が京都大学特定教授に就任され、系外惑星の観測と関連してデータベースに興味を示されました。そのような流れの中、データベースを本格的に公表しよう、ということになりました。でもやはり、やるからには、何か違ったものを出したいと考え、最低限の目標として(1)自分たちで独自のハビタブル基準を用いること、(2)系外惑星のイラストを自分たちのものにすること、および(3)日本語でのデータベースの作成、を掲げました。(2)についてはプロのイラストを頼もうとも考えましたが、これも学生を含めたチームでの一つの目標として一つ一つ描きあげることにしました。

2. ExoKyotoの特徴

ExoKyotoは、C++で記載されたunix上で動作する系外惑星データベースアプリケーションで、このデータベースを用いて生成したWeb上での公開惑星データベースも含んでいます(図1)。本体は、データベースモジュール(惑星・恒星・メシエ・NGC)、質量推定モジュール、運動解析モジュール、表示モジュール(Stellar Window)に大きくわかれていきます。(ただ、そもそもなぜC++でプログラムを書いたのか、というと、

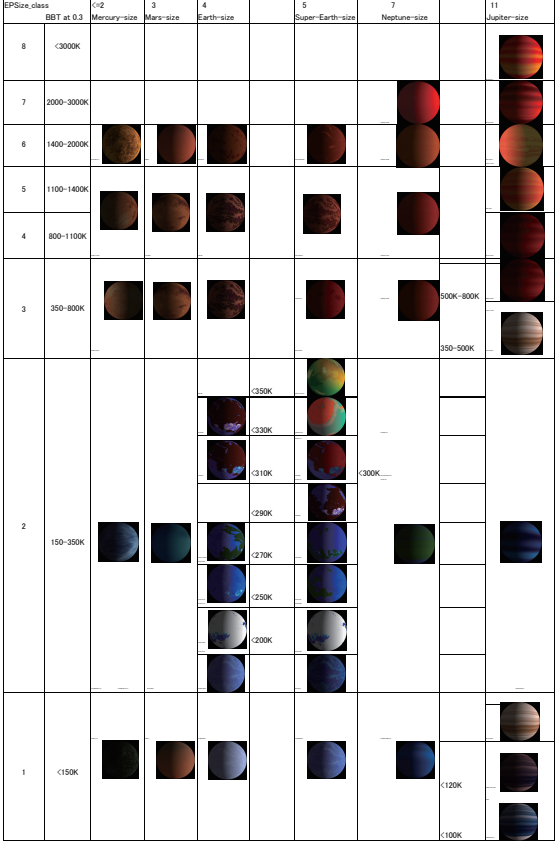


図2：用いたテクスチャの一覧，左から右へ，水星サイズ～超木星サイズへと大きさが大きくなり，下から上へ，150ケルビン以下から3000ケルビン以上まで，アルベド0.3にて計算された黒体温度にて分類している。

私が書ける言語で書いたから、というしかありません。「データベース」をつくる、と「決まった」ものの、放っておいたらだれかがやるか？と期待したのですが、仲間の誰も始めなかったのも、結局私が一から全部書き始めてしまいました。最初は表示モジュールまで作るつもりはなかったのですが、これもX-Window/XLibを用いて作ってしまいました。細野七月氏からOpenGLへの移行を勧められ、OpenGL版もモジュール単位においては作成しつつあるのですが、現時点のものはXlibを用いたものです。ただ、Python版などは作ってゆこうと考えています。)

(1) 自分たちで独自のハビタブル基準を用いる

現在記載されているのは、[1]における判定式であり、これも論文のものと、惑星の大きさを考慮した2種類

が記載されています。同時に、太陽系相当天文単位として、太陽系における金星・地球・火星における平均太陽定数と同じ位置を記載した線を表示しています。金星が赤、地球が緑、火星が青、スノーラインは明るい青となっています。これによって、太陽系においてはどのあたり、という「感覚」が明確になると考えました。現在、[1]以外のパラメータやフレア影響を考慮したハビタブルゾーンをテストしており、それらについても順次公開してゆく予定です。

(2) 系外惑星のイラストを自分たちのものにする

まずはNASAのイラストではない自分たち独自のイラストセットの作成を試みました。これは大学院生で元々地球物理を専攻していた黒木龍介氏と一緒に、太陽系における惑星のテクスチャを参考に、他の惑星系において一般的に受け入れられているテクスチャ集の作成を行いました(図2)。特にホットジュピターにおいては、様々な想像される色とパターンを作成しました。次に地球・スーパーアースですが、ハビタブルな温度域のテクスチャをいくつか作成し、海惑星、陸惑星と、海陸比において海が多い惑星の標準とした。惑星のテクスチャ選定において、アルベドを0.3と仮定して計算した黒体温度を用いていますが、これで地球と同じくらいの温度(255ケルビン)のものから、20ケルビン毎にイラストパターンを変更しています。やや温度の高い惑星の海洋に、(地球における貧酸素の兆候を示す) H_2S 過多のPink Waterの色をつけたりしました。が、このように海を描くと、固定観念からか海は青色、陸は基本的に緑色になってしまいます。学部学生でイラストに携わっている高木風香さんと、イギリスプリマス海洋研究所でリモートセンシングによる海洋色の判別を行なっているMarie-Funny氏によって、いくつかの海惑星の絵を描いてもらいました。その結果がかなり衝撃的だったのですが、海洋プランクトンの専門家は他の惑星系での海の色を緑や黄色が卓越したものと想像し、また大陸棚より浅い領域でサンゴが発達している様子をイラストに加え、我々が想像するものを越えた系外惑星の画像の執筆がありました。

現在はテクスチャ判定を惑星の大きさと黒体温度で決めています。大きな問題点があります。それは、潮汐ロックに関する明確な基準を定めていないことです。そのため、潮汐ロック惑星のイラストも準備して

いますが、それらの採用に関しては現在自動判別にはなっていません。だから、カタログの自動生成の想像図と個別記事の想像図は随分異なります。

また、ホットジュピターの絵はすでに広く想像図が描かれており、それらの色の根拠もあまりはっきりしていませんでしたが、我々はまずはSudarsky's Gas Giant Classification [2]を元に、いくつかのパターンを作成しました。ただし、例えばケイ素で青いと言われているHD189733bなどの色はあらかじめわかるわけではないので、一般的には(多くの人のイメージに合致した)赤系統の色を用いました。

さらに、主星からのスペクトルに伴って系外惑星の色(見え方)も変えようと、例えばM型星のスペクトルに近い光を与えると、系外惑星がハビタブルであっても青色系の光はほとんど見えなくなり、青がベースだと真っ暗になってしまう、というような「事件」もあり、これだとProxima Cen bも何かも青系統が消え去って赤いか黒い惑星になり、あまりにもイメージが異なるので、これは結局採用しませんでした。(未だにデータベースの中ではProxima Cen bは青くしています。)

また、このようなテクスチャ作成とOpenGLによる画像作成ではできない、直接の系外惑星の絵画を、SGH守山高校ハビタブル研究会所属の高校生に依頼し、今までのところ5人のメンバーがそれぞれの系外惑星の想像図を描いてきました(図3)。これらの画像は非常に評判が高く、また作成グループで十分に議論されながら想像図を示し、それをネット上でのデータベースで公開していることから「NASA 顔負けの」ク

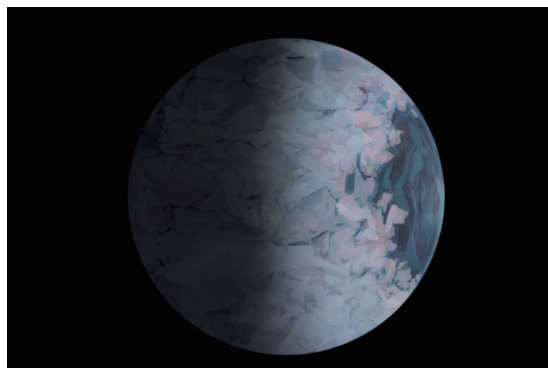


図3: TRAPPIST-1 fの想像図。アイボールアースを想定。(SGH守山高校ハビタブル研究会、稲垣遙さん画)

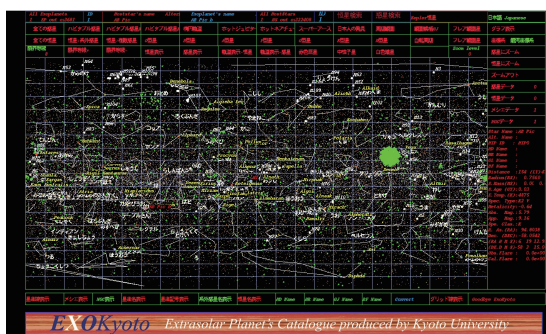


図4：ExoKyotoの惑星表示画面(日本語モード)。

オリティのものもいくつかあり、実際に筆者がNASA/GSFCで発表した際のこれらの図の評判も非常に高かったです。

(3) 日本語でのデータベースの作成

目標の3番目、これは佐々木貴教氏がそもそも掲げた目標でしたが、開発者の私は最後まで嫌がっていました。なぜなら、私はviユーザーだったからです。そこで、初期バージョンはホームページだけ日本語対応にし、データベースは英語でした。しかし、それではいろいろな問題がでてきて、メディアや利用者などから問題点を指摘され、日本語を導入「せざる」を得なくなりました。そこで、ちょうどデータベース公開1周年を記念して、ホームページ上のデータページと、アプリ版を日本語対応としました(図4, 5)。実際に日本語を導入してみるとしかしながら、我々にとっても、ようやく「自分たちのための」データベースができたことが「実感」できるとともに、系外惑星に関わる単語が、いかに日本語として馴染みが無いかについても確認させられました。また、SGH守山高校ハビタブル研究会の図と、日本語での解説を組み合わせた系外惑星に関する記事は評判がよく、今のところデータベース本体よりもアクセスが多い状況です。もともと佐々木貴教氏のアイデアですが、当初このような解説記事を書くのは恥ずかしくて皆躊躇していましたが、今では学部生も高校生も堂々と解説記事を書いており、それを教員や大学院生の野津兄弟(翔太・湧太氏)が修正して公開する、という方法をとっています。記事作成中に想像図をよりそれらしくするために、東工大の芝池論人氏にも参戦していただき、いろいろなアドバイスや解説記事を書いていただいております。

今年度に発表したアプリでは、メシエカタログの掲

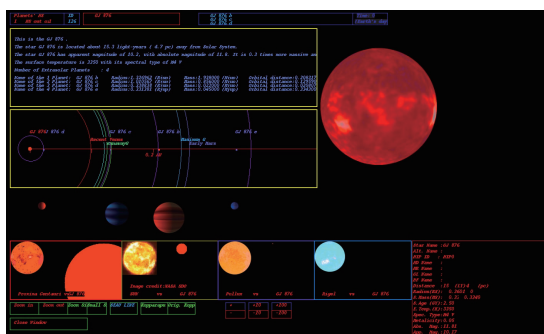


図5：ExoKyoto Hoststar Databaseを用いて表示したGJ876恒星系4つの系外惑星(GJ876 b, c, d, e)と中心星GJ876, 下の4枚の図はそれぞれその大きさの比較が、下の段の4つに記されています。左からハビタブルプラネットが見つかったProxima Centauri星との比較、二番目が太陽との比較、三番目がふたご座のボルクス(Pollux)との比較、一番右側がオリオン座のリゲル(Rigel)との比較。

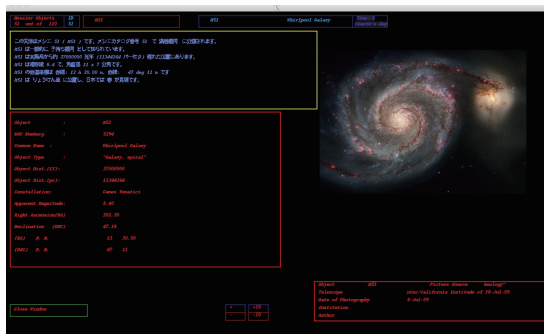


図6：メシエカタログM51。

載とNGC天体の掲載を行なっています(図6)。特にメシエ天体に関しては、ExoKyoto開発に参加している学部生の坂東日業さんの意図と努力によりその制作が開始され、筆者がプログラムを組み、星図に組み入れました。ただし、フリーの写真が限られており、現在のところNASA/Hubble画像と、Wikicommonsのものをアプリ版では引用つきで用いています。さらにNGC天体については、そのデータの inputs は済んだものの、ほとんど写真が体系的に集められていないことから、可能な天体に関してのみ写真を集め掲載しており、大半は説明のみになっています。また、銀河座標系の導入も行いました。簡単なことでしたが、全てプログラミングをするので、思った通りに変換できない場面もありましたが、無事完了しました。学部生の梨元昂くんにも随分手伝ってくれました。

ExoKyoto を利用することで、現在までに蓄積してきた恒星観測の情報や結果をもとに、新たなハビタブルゾーンの判定基準を加えたり、星や惑星系の進化に関する観測・議論に役立てたりすることができるとともに、様々な研究機関での観測データを融合して、今後重点的に観測すべき天体を選定・提案することができると期待されます。各大学やアマチュア天文家の方々が、系外惑星の観測を行ってゆく上での重要なツールとして、ExoKyotoを利用していただけると幸いです。

3. 様々なモジュール群

現在公開されている系外惑星データベースでは、もととトランジット法・視線速度法で独自に計測されている惑星が多いため、質量か半径のどちらかのパラメータが欠落しています。通常のデータベースでは、これらの値を空欄にしたまま公開するのですが、我々のデータベースではすべての惑星に関して図を表示する必要があります。その際、ホットジュピターに関しては推定半径を、またケプラーで観測された地球型惑星については質量を推定値として掲載しています。質量推定については現在[3]の方法を利用していますが、ホットジュピターに関しては統一的な推定式は提案されておられません。そこでExoKyotoでは、データベースに収録されており、かつ系外惑星の推定温度(アルベドを0.3として仮定した黒体温度)と惑星の推定質量毎に、惑星密度を推定し、これを利用して惑星半径を仮に決めています。

ExoKyoto のコアモジュールは C++ で記載され、「系外惑星」「ホスト星」などをはじめとする様々なクラスが定義されており、比較的シンプルなクラスになっていたのですが、ケプラーデータを挿入する際、複数のクラスの導入が必要になりました。例えば Kepler (ケプラー望遠鏡による観測対象星を ID 毎に並べたクラス)、KeplerName (Kepler ID と Kepler 名との関連クラス) と、Kepler 観測対象恒星と、見つかった惑星群を別々のクラスとして管理し、かつその関連性を定義する必要がありました。さらにメシエ天体・NGC 天体などをクラスとして導入しており、どんどん増えそうな勢いです。が、このようにすると、プログラム内部での統一的処理に障害をきたすなど問題も散見さ

れ、改良も必要になっています。

もう一つ、本データベースの特徴として、天球上での位置表示があります。開発当時公開されていたデータベースでは、系外惑星の位置がよくわからず、人に説明しようと思っても困る状況でした。そこで最初のバージョンでは、kml ファイルを生成して Google Sky 上に情報とともに表示するようにしました。これで目的を達成できたように見えたのですが、Google Sky 自身を自分たちで触ることができなかったため、例えば星図全体での表示ができない、系外惑星を有している恒星情報が欠落しているなどの問題点にぶつかり、自分たちで表示モジュールを開発することとなりました。この開発には学部学生たちが随分貢献してくれました。

4. ExoKyotoの惑星科学的貢献

ExoKyoto 自体が系外惑星を発見するものではないですが、いろいろと考えてゆく上で、ExoKyoto が「惑星科学」の発展に貢献しうるのは以下の2点かと考えられます。

(1) 恒星・惑星相互作用

現在突発的天体のほか、フレア星のデータを組み入れており、かつ前原裕之氏、野津湧太氏、そして柴田一成氏らの貢献により、フレア発生頻度や強度が算定できるようになりました。さらに、惑星大気を仮定した場合の、恒星から飛来する高エネルギー粒子や電離放射線による被曝量の推定ができるモジュールを組み入れております。このような試みは初めてであり、このモジュールの公開に向けた論文投稿を行っています。ただし、問題点もあり、そもそも恒星の自転に関するパラメータがほとんどデータとしてとられていないことです。そのため、ほとんどの惑星をもつ恒星のアクティビティは正確に計測されていないのが現状です。そのため、恒星のアクティビティを測定する必要性に関して統合的にメッセージを発信しつづけるという使命が考えられると言えるでしょう。さらに考えられるのは、ホットジュピターと恒星との関連性の整理です。現在準備中のトランジット予測モジュールとあわせて、特に周期が短い惑星系に関するパラメータを計算し、必要な観測につなげることが重要かと思われます。

(2) 新しい観測対象天体の選定

銀河面からの位置関係などが明らかになり、恒星のタイプもわかるので、特に地上からの観測対象天体の選定には役に立つと言えます。また、ExoKyotoは惑星や恒星を様々な条件で検索し、望みの天体を検索することができます。ただし、恒星データベース(数億)に比較すると登録されている恒星が少ないので、現在それらを入れる準備をしております。

なお、開発を行っているのは私を中心としたチームですが、開発や公開にあたって佐々木貴教氏の存在と貢献は非常に大きいといえます。どの程度の精度を備えれば良いか、またどのような項目が望まれているか、また絵の描写においても様々な観点からのアドバイスをいただきました。そもそもデータベースを公開してそれが「惑星科学」でどの程度の意義があるのかは我々にはわからず、ひたすら作り込んでいった中を、うまく現在の学問のトレンドをつかんでアドバイスを行っていただきました。また同時に、宇宙飛行士の土井隆雄氏が、本データベースを用いての小口径望遠鏡での系外惑星観測システムを立ち上げたことも大きなモチベーションになりました。メディアでの発表においても、その注目度をあげていただき、こちらとしても、本物の宇宙飛行士とともに「開発」できるということが一つの大きな喜びとなりました。同時に、山崎直子宇宙飛行士のパソコンでも本データベースを使っただき、いろいろアドバイスをいただいています。

またこの9月に筆者は初めてNASA/GSFCを訪問し、Airapetian 博士の紹介のもと、Kopparapu博士本人にもExoKyotoを披露してきました(図7)。ハビタブル判定をつくった本人の元に我々が「手作りで」

つくったExoKyotoを見せるのは非常に感慨深いものであり、今後、本当に「NASAと協力」して、このアプリを充実させてゆけるように、現在様々な準備をすすめているところです。

5. 「ExoKyoto」のご利用について

系外惑星データベース「ExoKyoto」をご利用された方は、氏名、所属、メールアドレス、ご利用の目的を記載して mail@exoplanetkyoto.org までお送りください。(無償です;現在 Mac OS X上でのみ作動します)

ExoKyotoのご利用は無料ですが、ExoKyoto開発基金については寄付を受け付けております。小口(千円単位)も歓迎します。賛同いただける方は、以下の「宇宙ユニット基金」にてご寄付をお願いします。

<http://www.kikin.kyoto-u.ac.jp/contribution/space/>

参考文献

- [1] Kopparapu, R. K. et al., 2013, *Astrophysical Journal* 765, 131.
- [2] Sudarsky, D. et al., 2000, *Astrophysical Journal* 538, 885.
- [3] Weiss, L. M. and Marcy, G. W., 2014, *Astrophysical Journal Letters* 783, L6.

* 系外惑星データベース

ExoKyotoアプリケーション開発メンバー*

山敷庸亮(京都大学大学院総合生存学館:開発責任者)
全体モジュールデザインおよびC++コード作成
細野七月(京都大学大学院総合生存学館) 3D表示モジュール、惑星軌道モジュール作成
黒木龍介(京都大学大学院総合生存学館) 系外惑星・恒星テキストチャー作成
村嶋慶哉(京都大学理学部) 惑星軌道ディスプレイモジュール設計
佐藤啓明(京都大学工学部)
ハビタブル判定式確認、データ確認
真柳和也(京都大学理学部)
Stellarモジュール開発補助
野津翔太(京都大学大学院理学研究科) ハビタブル判



図7: Kopparapu博士(左)と筆者(右)。NASA/GSFCにて。

定式提案, 恒星パラメータ推定

野津湧太(京都大学大学院理学研究科) ハビタブル判定
定式提案, 恒星パラメータ推定, フレアモジュール
開発

芝池諭人(東京工業大学理学院) 惑星科学専門の立場
からの記事執筆とアドバイス

伊藤岳陽(京都大学理学部) Kopparapu 判定式導入

嶋田侑治(京都大学農学部) 質量推定式(Larsen &
Geoffrey, 2014) 導入

高木風香(京都大学農学部) 惑星・恒星テクスチャ作
成

梨元 昂(京都大学理学部) 座標変換補助, NGC モ
ジュール

坂東日菜(京都大学理学部) メシエモジュール補助

下崎紗綾(滋賀県立守山高校)

系外惑星イメージ図描画

藤田汐音(滋賀県立守山高校)

系外惑星イメージ図描画

稲垣 遙(滋賀県立守山高校)

系外惑星イメージ図描画

清水海羽(滋賀県立守山高校)

系外惑星イメージ図描画

前田理那(滋賀県立守山高校)

系外惑星イメージ図描画

佐々木貴教(京都大学理学研究科) 惑星科学専門の立
場から全体開発計画のアドバイス及びデザイン

* ExoKyoto を用いた系外惑星観測推進メンバー *

土井隆雄(京都大学宇宙総合学研究ユニット)

ExoKyoto 観測モジュール設計およびテスト

三木健司(京都大学大学院農学研究科) 観測実施

木原孝輔(京都大学理学部) 観測実施