

29. 太陽系外惑星の世界地図推定を目指した多色同時測光システムの開発

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所宇宙物理学研究系 准教授 河原 創

概要

太陽系外惑星は数千個以上見つかり、なかには地球サイズのものもあるが、実際はサイズと質量しかわかっていない。そこで惑星の光度変動から表面マップを復元する「惑星マッピング法」を提案し、NASAの宇宙直接撮像計画(HWO)での実現を目指している。現状では技術的制約により単色しか同時に光度曲線を計測できず、マッピングには、最低二色、理想的には三色以上が必要とされるため、同時多色撮像コンポーネント「Planet Color Module」を開発中である。このコンポーネントをHWOに搭載できる技術レベルにするには、宇宙環境を模擬した超高安定下の真空試験が必要である。その試験に供するため真空チャンバー試験設備を、宇宙科学研究所内に設置し、高安定化をしている途中である。この試験では特に温度の安定が必要である。そこで本研究では特に真空試験の高精度温度コントロールシステムの製作を行った。この温度コントロールシステムは、大型チャンバー内に設置する24枚の面上ヒーターと36個の温度センサーを備え、また大型の真空チャンバー内外をつなぐケーブルフィードスルーを介して、チャンバー外部の制御PCへと接続を行うシステムである。現在、別財源でのチャンバー内光学ベンチの設置中であり、チャンバー設置状態での真空下でのテストはまだできていないものの、コントローラシステムの製作および真空チャンバー設置前のテストが完了した。また、これらの活動を含めて、宇宙科学研究所内にHWO参加へむけた所内タスクフォースが立ち上がり、HWO参加にむけ前進した。

背景および目的

太陽以外の星の周りをまわる惑星、太陽系外惑星は今や数千個以上見つかり、ハビタブルゾーンと呼ばれる海洋を有することのできる領域に地球サイズの惑星も見つかってきている。このような「ハビタブル惑星」はその発見の度に「地球に似た惑星のイメージ図」とともにニュースとなる。しかし、実はそのような「地球のような惑星」はあくまで想像図であり、実際のところは惑星の大きさと質量が分かったに過ぎない。これは本質的には地球から系外惑星が遠すぎるため空間分解して撮影できないからである。我々は、この状況を解決しうる惑星表面のマッピング法を提案している(Kawahara and Fujii 2010 ApJ 720, 1333 他)。惑星マッピング法では、系外惑星の光の強さの時間変化(光度変動)という一次元情報から、医療用CTのように惑星表面の二次元マップを再生する(図1)。

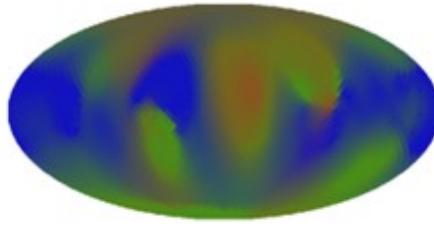


図 1. 地球観測衛星 DSCOVR による実際のデータから作成した光度変動から地球表面を再生した惑星マップ.

大陸分布が再現されているのが見て取れる. Kuwata, Kawahara, Aizawa et al. ApJ 930, 162(2022)より。

この方法を実現するには、宇宙直接撮像と呼ばれる、宇宙から系外惑星を点として撮影することが必要である。事実、NASA の次期計画では宇宙直接撮像計画（HWO）を 2040 年代に実施する最優先の課題としている。しかし、現在の宇宙直接撮像研究は惑星スペクトルの取得に主眼が置かれ、大陸・海洋の有無といった惑星表面情報については真剣に考えられていない。そのため現在の検討では、技術的制約から単色でのみ連続的に惑星の光度変動を取得できる。しかし惑星マッピングには、最低二色できれば三色以上の同時光度変動情報が必要である。そこで同時多色撮像可能な直接撮像用装置デバイス Planet Color Module の開発を高性能化した宇宙研の真空テストベッド施設を用いて加速し、2040 年代打ち上げに向け動き出した HWO への搭載を目指し、惑星マッピング実現のための礎としたい。

方法

惑星マッピング実現へむけての多色同時撮像の必要性

図 2 に惑星マッピング法の原理を示す。地球型系外惑星の表面は、その組成に応じた固有の反射スペクトルを持っているため、恒星に照らされるとそれぞれの色を発する。宇宙直接撮像では、惑星表面の空間分解はできないが、観測者に見える昼面の表面組成の割合で「色が混ざった点」として観測される。惑星は自転・公転運動で常に観測者に向ける面を変化させるため、多色で連続的に惑星光を観測することで惑星表面の空間情報を取得できる。これを逆に再生することで、図 1 のような惑星マップを再生することができる。このように惑星マッピングには同時に多色で惑星光をモニタリングすることが必要である

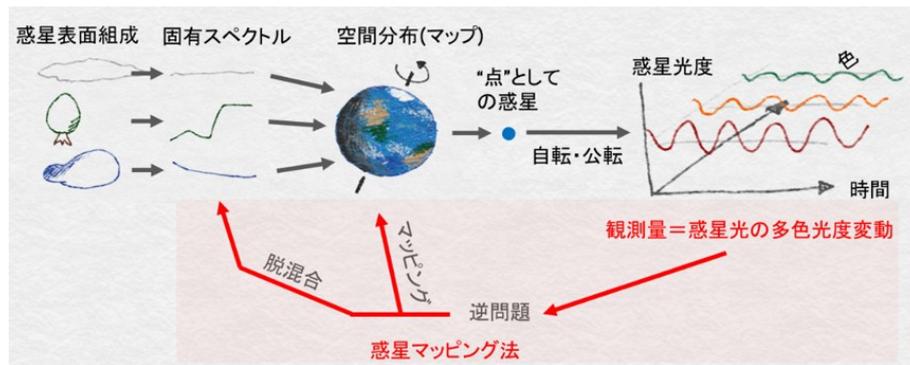


図2. 惑星マッピング法の概念図

(左)惑星の表面組成は異なる反射スペクトルを持つ。これらが観測者に見える表面領域で積分され、観測される“点”として惑星光を構成する。惑星は自転・公転に伴い見える領域が時々刻々変化するため、多色光度変動(右)が観測量となる。これは空間情報を含んでいる。ここから惑星の空間分布や固有スペクトルを推定するのが我々が提案している惑星マッピング法(Spin-Orbit Tomography)である。

多色同時撮像装置コンポーネント Planet Color Module とそのための真空試験設備 HOCT の温度高精度コントロールの必要性

一方で、NASA が主導する宇宙直接撮像計画の Habitable World Observatory(HWO)は、今後 10 年間で研究が進み、2040 年代に打ち上げを目指すとされているが、その詳細な検討は今、始まったばかりである。その前身である LUVOIR 計画では、紫外・可視・近赤外の大きなくくりでは同時測光ができるものの、惑星マッピングに重要な可視領域内では単色でしか同時測光ができないという問題がある。これは、次の事情によるものである。直接撮像では、惑星の位置への恒星光の漏れ込み（スペックル）を最小限にするために、多数の小さな鏡の集合からなる「可変形鏡」を使って光の位相空間分布（波面）を制御する。このスペックル制御により惑星位置で漏れ込みの少ない領域「ダークホール」を“掘る”。しかし、スペックル制御は、原理上、受光面（焦点面）において、恒星位置（光軸中心）から光の波長に比例した距離にダークホールが掘られてしまう。そのため、色によってダークホールが掘られる位置が移動してしまい、可視光域の様々な色で同時に惑星の位置にダークホールを掘ることができない。そこで北海道大学・村上尚史（共同研究者）氏、天文台米田謙太（共同研究者）氏主導でこれを打破する装置概念 Planet Color Module が提案された。このデバイスは、惑星の位置が受光面上の特定の角度にしか存在しないことを考慮し、それぞれの色で、スペックル制御をする面をあらかじめ回転させ、それを元の空間に戻すことで、様々な色で惑星位置にダークホールを掘ることができる。このコンセプトは、通常の実験室レベルでの試験で実証されている。しかし、この種の宇宙直接撮像装置の開発においては、宇宙の真空状態・高温安定状態と同様の環境で試験・開発をしなければ、真の性能を引き出すことができない問題がある。実際、上述の「実験室レベルでの試験」というのも、大気下で熱安定ができないため、要求されるレベルの数百倍以上高いノイズレベルでしかダークホールを掘れていないことが原因である。そのため「実証されている」というのは、そのような悪条件下での挙動を確認しただけに過ぎない。真に衛星搭載可能な装置を開発・テストするためには、真空・温度安定した「箱」（テストベッド）を用意し、その中で開発をする必要がある。JPL（アメリカ合衆国）のものが有名だが、毎回 JPL まで持って行って試験・改良をすると、コスト・開発期間も増加してしまう。

そこで本計画では JAXA 宇宙研にて大型の真空チャンバー HOCT を開発している塩谷圭吾（共同研究者）、高橋葵氏（共同研究者）らとともに HOCT を超温度安定化することで、Planet Color Module の衛星搭載に向けた開発を開始する。HOCT は、元は赤外線天文衛星 SPICA を機に開発された世界的にも数少ない大型（約 2.4 m × 1.4 m × 0.5 m）の真空テストベッドであり、内部に複雑な光学系を展開して実証することができる。真空にする主な目的は、究極的な性能を実証するにあたり、温度安定性と大気分子による擾乱を回避するためである。HOCT は

チャンパー内温度環境もそこそこ安定である。しかしチャンパー周囲の温度変化は、輻射や伝熱を介して光学系に影響するためさらなる温度制御が必要である。そこで特に本研究では HOCT 内に設置する超精密な温度制御ユニットを製作する。そして Planet Color Module が成立すること、すなわち地球型惑星の多色同時測光が可能であることを実証することを目指す。以下では、具体的な方法について説明する。長時間にわたる惑星観測を実現するためには、観測期間中に、真空チャンパー内の光学系全体の温度を約 0.01K 以下の精度で安定させる必要がある。そのためには、多数の面状ヒーターと数十のチャンネルを持つ温度センサーを取り付けたアルミ製の箱（サーマルエンクロージャー）で覆い、このエンクロージャーの温度を精密に制御することで、光学系全体の温度を輻射で均一かつ安定に保つ。特に精密な温度制御が必要な一部の光学系については、直接ヒーターを取り付けることでさらに安定化させる。

結果および考察

本助成期間中に高精度温度コントロールシステムの製作を行った。本研究で製作した高精度温度コントロールシステムの設計を図 3 に示す。図 3 に示されているように、真空チャンパー内のボックスには 24 枚の面上の温度ヒーターが接続され、その横にはそれぞれ制御用の温度センサーが配置されている。また制御用だけでは、本当にチャンパーが温度安定なのか計測できないため、別に参照用の温度センサーも 12 チャンネル備えている。またヒーターは 1 枚のサイズが 200×300mm の面上ヒーターであり、大型チャンパー内に均一に配置することで、全体の温度ムラをなくし、光学系の安定性を担保する。これらのヒーター及びセンサーをケーブルフィードスルーを介してチャンパー外部の温度コントローラおよび制御 PC と接続される。特にケーブルフィードスルーは多数の配線をまとめて外部に接続するシステムであり、本研究での核となるコンポーネントである。

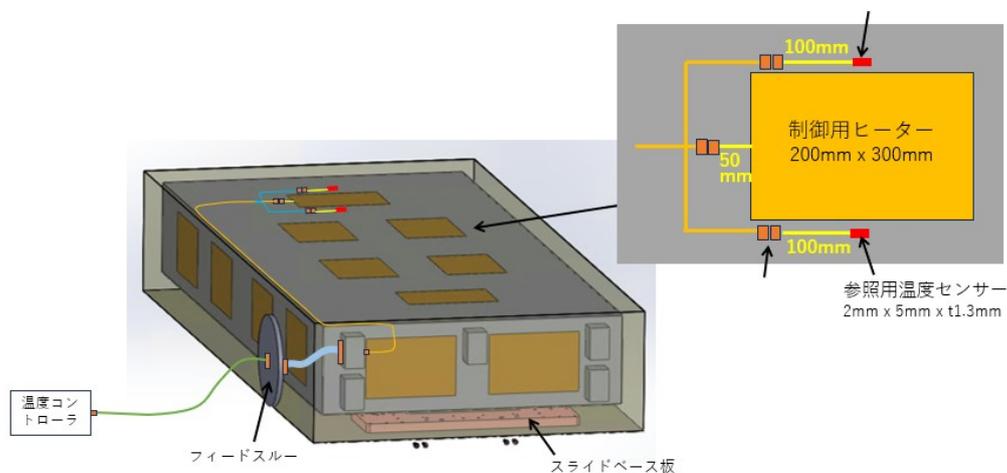


図 3. 精密温度コントロールシステム設計概要

温度コントローラはフィードスルーを介して、チャンパー内のアルミボックスに貼られたヒーター 24 枚と 24 チャンネル制御用温度センサー・12 チャンネル参照用温度センサーに接続される。

製作したコントロールシステムの一部の特にケーブルフィードスルー部分の写真を図 4 に示す。試験の時の取り回しを重視し、6 つ（1 つは予備）の接続に分割し、また、真空内でもフィードスルーとの接続を切って作業できるように、複数のケーブルを束ねた接合部を製作した。これにより非常に多数の配線をチャンパー内で効率よく取り外しでき、光学系の設置の障害とならないようにしている。

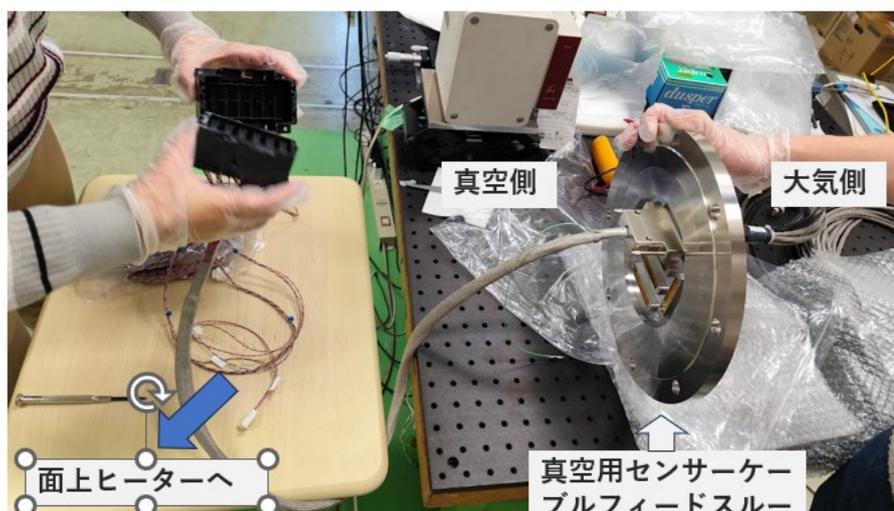


図4. 製作したケーブルフィードスルー・システム

円盤状のフィードスルーがHOCTの側壁に設置され、チャンバー内のヒーター・センサーと大気側の制御PCを接続する。この図では見やすさのため6主要配線のうち1つだけを接続している。実際にはこの6倍の配線がつながるようになっている。

以上のように温度コントロールシステム自体は製作が完了し、接続テストも行った。ただし、現在、チャンバー(HOCT)本体の大幅改修中であり、2024年度末にスライド式定盤を設置したのちに、今回製作した温度コントロールシステムのインストールを行う予定である。また村上氏の北大から宇宙研に近いアストロバイオロジーセンターへの異動、および米田氏の宇宙科学研究所への異動に伴い、PCMの試験系もチャンバー近傍での設置・実験ができるめどが立ち、今後の開発が加速する予定である。

また、これらの開発と並行し、宇宙科学研究所内で、HWO参加のためのタスクフォースが立ち上がり、日本からのHWO参加への検討が本格的に始まった。本研究に参加しているHOCT PIの塩谷がタスクフォース・リーダーとなり、本研究の代表である河原もタスクフォースに参加している。このように申請時時点に比べ、HWOへの参加の機運は大幅に高まっていると言えよう。

以上に加え、本研究に参加している学生2名が主著となる系外惑星の大気探査に関する論文も並行して進んだ。そのうち一つはHWOの前段階であるJWSTによる大気探査に関するもの(Tada et al.)であり、もう一つは大気探査のより基礎的な情報である系外惑星大気下(水素ヘリウム大気下)での分子線の実験論文(Hosowaka et al.)である。これらも本研究に関連した成果として報告したい。

(完)

発表論文

- 1) Probing 2D Asymmetries of an Exoplanet Atmosphere from Chromatic Transit Variation, Shotaro Tada, Hajime Kawahara, Yui Kawashima, Takayuki Kotani, Kento Masuda, Accepted by Astronomical Journal (2025)
- 2) Measurement of Methane Line Broadening in Hot Hydrogen/Helium Atmospheres at $\lambda = 1.60\text{--}1.63 \mu\text{m}$ for Substellar Object Spectroscopy
Ko Hosokawa, Takayuki Kotani, Hajime Kawahara, Yui Kawashima, Kento Masuda, Aoi Takahashi, Kazuo Yoshioka, accepted by Astrophysical Journal (2025)