

超精密分光観測による革新的系外惑星探索

○田實晃人（国立天文台）、佐藤文衛（東京科学大）、泉浦秀行（国立天文台）、稲場肇、大久保章（産業技術総合研究所）、寶田拓也（アストロバイオロジーセンター）

概要(Abstract)

惑星の周回による主星の運動を、スペクトル吸収線の波長変化としてとらえる観測手法（視線速度法）は、「第二の地球」を発見する最有力の手段である。近年、測定精度は数十 cm/s 以下に向上しているが、恒星自身の表面活動による変動がそれより数倍大きく、惑星検出の大きな障害となっている。

本研究では、比波長分解能 30 万の超高波長分解能と cm/s レベルの超高精度が同時に実現された革新的な分光器を岡山 188cm 望遠鏡/せいめい 3.8m 望遠鏡用に開発する。そして、スペクトル吸収線の精密な形状計測から恒星活動の影響をモニター・補正し、cm/s レベルの精度で恒星の視線速度変化を測定することによって、第二の地球探索に挑む。

2025 年度から科研費・特別推進研究によって開始された本計画の概要と進捗について報告する。

1. はじめに

宇宙における生命の起源・進化とその普遍性の解明は理学の重要課題である。1995 年の系外惑星初検出以降、5500 個以上の系外惑星が発見され、近年は太陽近傍の赤色矮星のハビタブルゾーンに地球型惑星が多数見つかっている。次の重要目標は、太陽近傍の太陽型星周りにおける「第二の地球」候補の検出である。

その最適手法が、可視光高分散分光による視線速度法である。太陽型星は可視で明るく、この手法は広い軌道半径・惑星質量に対応できる。現在の精密視線速度測定は 1 m/s 未満の変動検出域に到達しているが、この領域では恒星の脈動、対流、黒点、活動周期などの恒星自身の変動が大きな障害となる。実際、測定精度が 30 cm/s 以下の装置が存在するにもかかわらず、近年発見された惑星の最小振幅は 1-2 m/s にとどまり、検出は恒星変動に制限されている（図 1）。

これを克服するには、吸収線ごとの輪郭変動を調べ、惑星起因の単純な波長シフトと恒星大気運動による形状変化を識別することが本質的に重要である。吸収線は形成深さが異なるため、線ごとの解析が必要だが、従来は多数線を平均的に扱う手法が主流で、その限界が認識されつつある。しかし現状では、分光器の波長分解能不足により線輪郭の精密解析は困難である。太陽型星の典型的線幅（約 5 km/s）に対し、既存の高分散分光器の分解能は最大でも約 2 km/s ($R \approx 15$ 万)にとどまり、器械輪郭の影響が無視できない。近年の研究は、少なくとも $R \approx 30$ 万の超高分解能スペクトルが必要であることを示している。さらに、cm/s 級の超高精度波長基準、高頻度観測を可能にする高速検出器、長期にわたる豊

富な望遠鏡時間も不可欠であるが、これらすべてを満たす分光器は現在まだ存在していない。

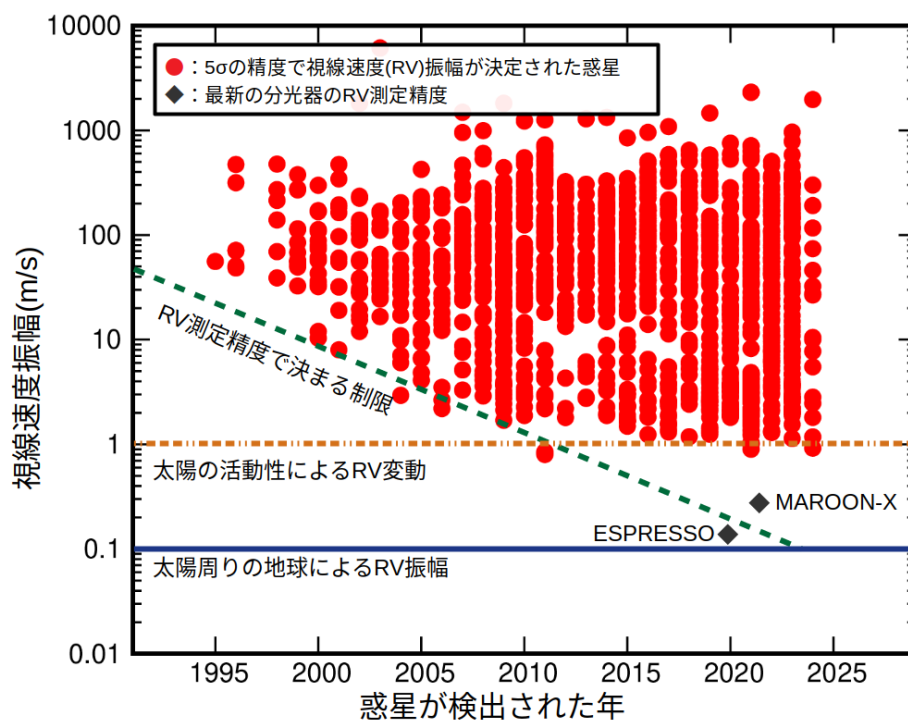


図 1：惑星発見年と主星の視線速度振幅の変遷

2. 計画概要

この問題解決への挑戦として、我々は以下の「5 つの『超』」を同時に実現する新型分光器を岡山 188cm/せいめい 3.8m 望遠鏡用に開発している。

- ① 超高波長分解能：比波長分解能 $R \approx 30$ 万
- ② 超高精度波長較正：速度換算で 10 cm/s 以下（ゴール 1 cm/s）
- ③ 超高時間分解能：最短で秒スケールまで
- ④ 超広波長域：400 – 900 nm
- ⑤ 超大量長期間観測：数年以上

これらすべてを兼ね備える分光器は未だ存在しないが、以下のキーアイテムによって我々はこれを実現し、「cm/s レベルでの太陽型星の変動現象の解明」と「太陽近隣の太陽型星を周回する地球型惑星の探索」に挑む。

2.1. キーアイテム 1：分光器本体

本装置の要点は、超高波長分解能とコンパクト性の両立である。高分解能の実現には高分散素子が不可欠であり、現時点で最も有効なのはエシエル回折格子である。コスト面を考慮し、モザイクではなく単一格子を採用し、入手可能な中で最大分散となる 31.6 本/mm、長さ 400 mm 超のものを選定・製作する予定である。将来的な真空封入による高安定化も見据え、装置のコンパクト化のため、類似型分光器でも世界的に普及している瞳移行型光

学系を採用する。鏡面に Protected Ag を採用することで、反射回数の増加による効率低下を可能な限り抑制する予定である。また、同様にコンパクト化の観点からスリット幅は 50 μm 以下に抑える必要がある。ただし、この幅は極めて狭く光利用効率が低下するため、その補償としてイメージスライサーの導入が不可欠となる。

2.2. キーアイテム 2：イメージスライサー

188cm・すばる・せいめい望遠鏡での実績を踏まえ、それを発展させる形で設計検討を進めている。検討例として、焦点面の 1.5–2.7 秒角の星像を 100 μm ファイバーを介して取り込み、F 変換により直径 1 mm にした後、Bowen–Walraven プリズムで 10 スライスを生じ、その出射光を 1/2 倍のリレー光学系で 50 μm スリット幅の整列像へ再構成する方式を想定している。このような小口径光束に対し 5 枚を超えるスライスは未実現であり、本計画の重要な開発要素である。海外では平行平板の代わりに対向鏡を用いる鏡型スライサーも提案されている。課題は残るものの実験室での試作が可能であるため、プリズム型の外注と並行して研究を進め、より高性能な方式を実観測へ投入する計画である。

2.3. キーアイテム 3：天文コム

レーザー周波数コムは、時間軸上ではフェムト秒級の超短パルス列として、周波数軸上では等間隔の多数の輝線が広帯域に分布するレーザー光である。本計画では、天体観測用レーザー周波数コム（天文コム）を常時の波長基準として用いることを前提に分光器を設計しており、分光器の最高分解能 $R \approx 30$ 万に最適化した、繰り返し周波数約 10 GHz の天文コムを新たに開発する。繰り返し周波数の低減はスペクトル拡大に有利であり、既存の 30 GHz コムで可視域カバー率 60%以上を達成していることから、10 GHz 級では可視域を切れ目なく覆える見込みである。これにより、コム線密度の増加、分解能の向上、波長域の拡大を通じて、従来の HIDES-F と比べて一桁以上の較正精度向上が期待される。

2.4. キーアイテム 4：検出器

本装置では、広波長域にわたるエシエルフォーマットを高サンプリングでカバーし、かつ高時間分解能および高頻度キャリブレーション取得に対応するため、高感度・広波長域・大面積・(適度な)小ピクセルサイズ・高速読み出しを兼ね備えた検出器が不可欠である。従来は CCD が主流であったが、近年では大フォーマットの CMOS カメラも入手可能となっており、これらも視野に入れて機種選定を進めている。現状の有力候補として、青側 (400–570 nm) には SONY 社製 CMOS IMX411 (3.76 $\mu\text{m}/\text{pix}$, 53.0×40.0 mm)、赤側 (470–900 nm) には Semiconductor Technology Associates 社製 CCD STA5700 (9 $\mu\text{m}/\text{pix}$, 95.0×95.0 mm) を検討している。

3. 環境変動に対するスペクトルの安定性の調査

さらなる重要キーアイテムとして、気温・気圧・湿度などの環境変動に対する分光器の安定性の確保をする必要がある。このため、我々のグループによって開発され、せいめい望遠鏡で運用されている高分散分光器 GA0ES-RV において、同種の安定性評価を行った。

GAOES-RV は波長分解能 65,000 のファイバーフィード型エシエル分光器であり、望遠鏡フロア階下の恒温室内に分光器本体を設置し、室内は ± 0.1 °C以内に制御された精密空調下で運用されている。また、観測波長域は 516-593 nm に固定されている。同装置は 2023 年 7 月から共同利用に供されており、2026 年 1 月までの約 2 年半の観測で取得された比較光源 (Th-Ar) スペクトル (約 1,000 フレーム) のずれを、二次元スペクトル上の輝線重心の測定により評価した。その結果、エシエル分散方向のずれについて、気温および気圧との強い相関が確認された (図 2)。

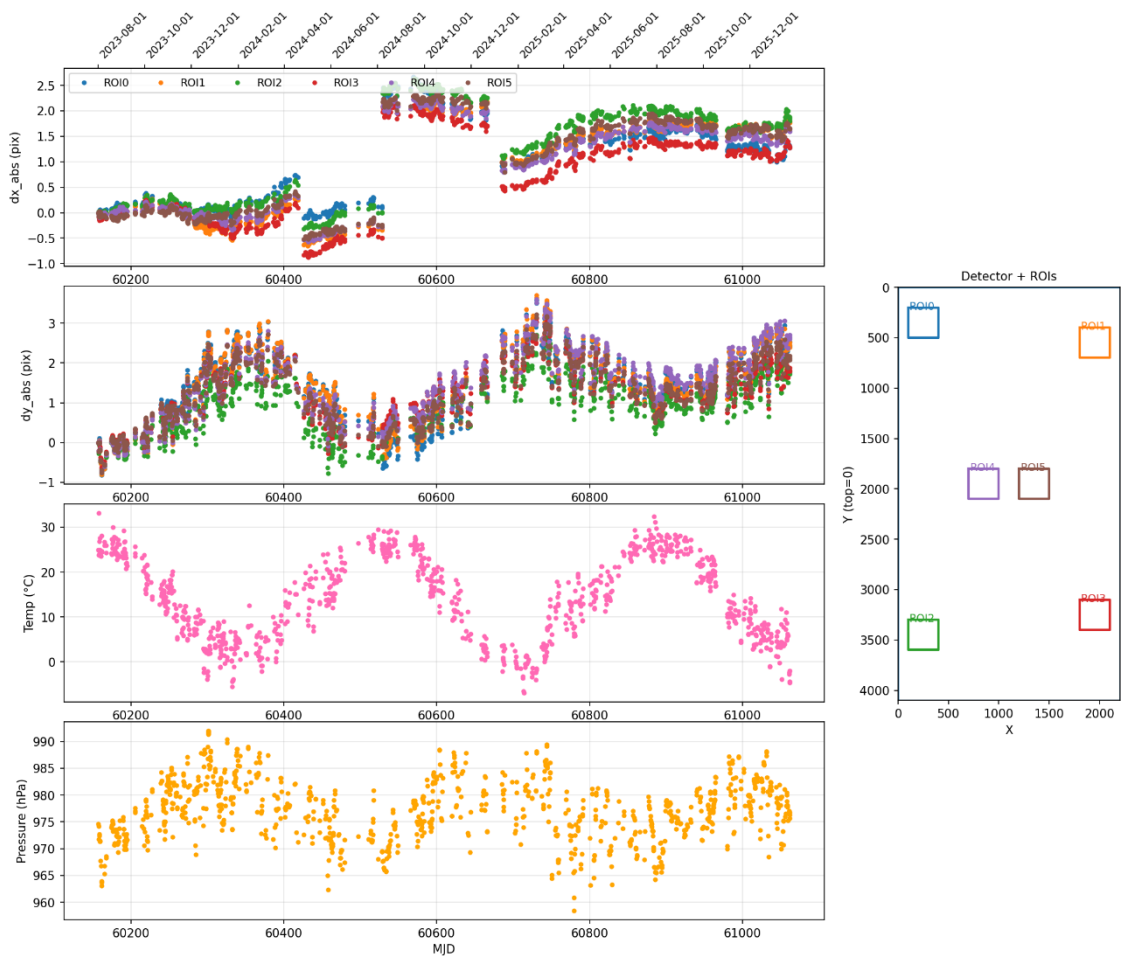


図 2 : 2k×4k CCD 上 6 カ所 (右) で測定した GAOES-RV 比較光源の位置ずれ (dx : クロスディスペルザー分散方向、 dy : エシエル分散方向、単位はピクセル) と各露出終了時の外気温と外気圧。 dx に一部ずれがある期間は分光器室精密空調の設定温度 (20 °C) を 19 / 21 °C にそれぞれ変更している。

クロスディスペルザー分散方向のずれ量 (dx) は、分光器室内の空調設定温度に非常に敏感に反応している。また、外気温との緩やかな連動も見られる。これは、クロスディスペルザー・グレーティングに角度調節機構があること、ならびに支持部がアルミニウム/ステンレス製で温度変化に敏感であることが原因と推測される。

一方、エッセル分散方向のずれ量 (dy) についてさらに詳細に検討すると、気温については一晩内の温度変化に追従するような俊敏な変化は確認できないが、気圧については即応性が非常に高い (相関係数 0.93) ことが判明した (図 3)。この変化は、気圧変化に伴う空気屈折率の変動を検出しているものと解釈される。空気屈折率は約 1.000270 程度であり、温度 1°C で約 -1 ppm、気圧 1 hPa で約 0.3 ppm、湿度 10% で約 -0.1 ppm 変化する (modified Edlén's equation; e.g., Filippenko 1982, PASP, 94, 715)。精密空調された GAOES-RV では、温度変化の影響は (熱容量の大きなドーム等を介して支持部に伝わる長期的変動を除けば) ほぼ無視できる一方、気圧変化は敏感に検出されることが明らかとなった。

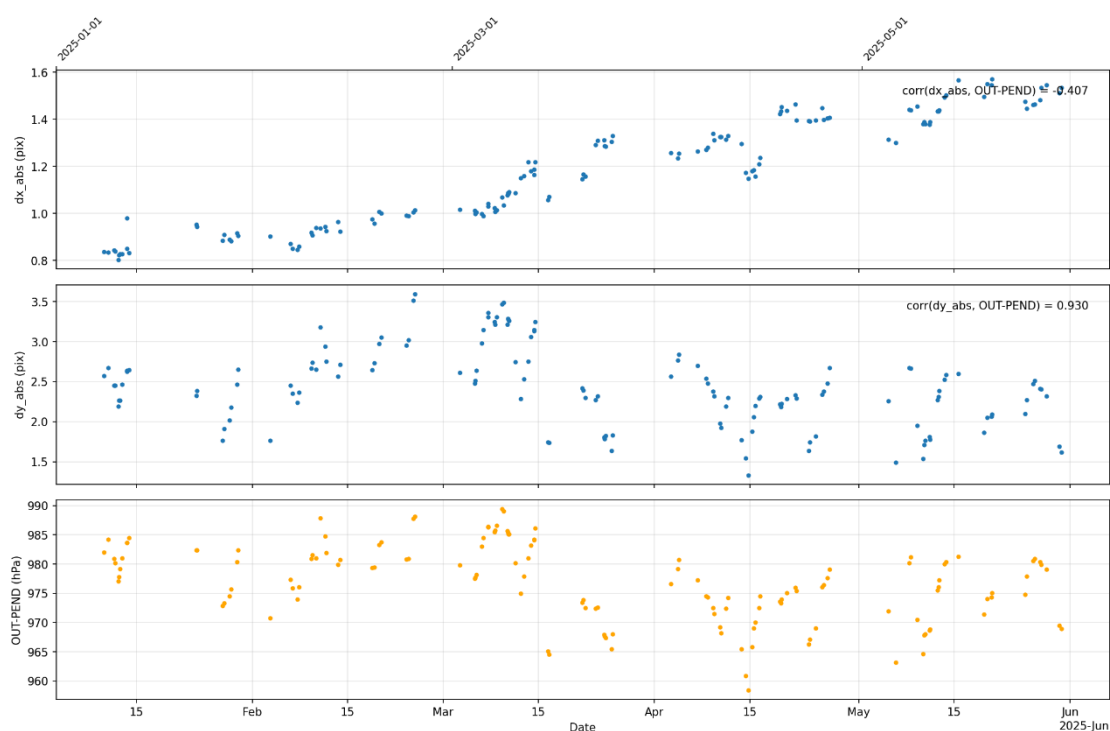


図 3 : dx , dy と気圧の相関 (5ヶ月間)

GAOES-RV の約 5 倍の比波長分解能をもつ新分光器では、ピクセル上でのずれ量は単純に約 5 倍に増幅される。過去の GAOES-RV 観測データから、岡山における平均的な気圧変化は 1 時間で 0.51 hPa、最大で 2.8 hPa である。これは視線速度に換算すると、それぞれ 39 m/s および 215 m/s に相当する。これらの値は本研究の目標視線速度精度を大きく上回っており、天文コムによる高精度波長較正を行っても、天体露出中の屈折率変動によって視線速度測定精度が劣化することを意味する。

以上より、計画立案時には将来的オプションとして位置づけていた分光器の真空チャンバー封入が、実質的に不可欠であることが判明した。今後は分光器設計および費用面の見直しを行いながら、2028 年度の観測開始にむけて製作を進める予定である。