

## 40 cm 望遠鏡による木星表面構造の分光観測

岩崎和人\*・須藤祐実\*・田部一志\*\*・弘田澄人\*\*\*・鈴木秀彦\*

Spectroscopic observation of Jovian surface structures by using the 40cm telescope

Kazuto Iwasaki\*, Yumi Sudo\*, Isshi Tabé\*\*, Sumito Hirota\*\*\*

and

Hidehiko Suzuki\*

### 1. 研究の背景および目的

木星表面には緯度毎に縞 (Belt)、帯 (Zone) と呼ばれる特徴的な縞模様が複数存在し、その境界にはオーバルと呼ばれる大小様々なスケールの渦が維持生成されている。各種構造の色の違いや変動は雲頂高度の違いや、雲に含まれる元素成分の違いなどに起因するなどと言われているが、詳しいメカニズムは未解明である。最近では、色度図を用いたスペクトル解析により各構造の色は白色と橙色の2つの物質の混合で決まるといった可能性も指摘されている (Ordonez- Etxeberria *et al.*, 2016)。そこで本研究では、スケールの長期変動や、自身より小さい渦との相互作用によってその色合いの変化などの観測事実が報告されている大赤斑 (GRS) (Sánchez-Lavega *et al.*, 2013) や、色に経年変化がみられる縞・帯といった木星大気に準永続的に見られる代表的な表面構造に着目し、表面構造における「色(=可視スペクトル)」の変化から木星大気ダイナミクスの解明を目指す。本報告では、GRSなどを空間分解しつつ、その反射スペクトル観測が可能な分光ユニットの詳細およびその校正結果、かわさき宙と緑の科学館の所有する口径40 cmの反射望遠鏡 (三鷹光器 GNC-40) と本分光ユニットを組み合わせて実施した木星分光観測結果の初期結果およびその評価を報告する。

### 2. 観測装置

本研究では木星の表面構造の任意の部分をピンポイントで分光観測可能な可搬型の分光ユニットを開発した。装置の概要を図1に示す。

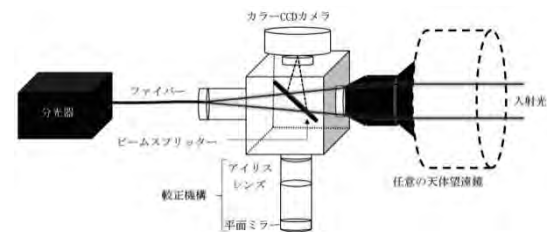


図1. 任意の望遠鏡に取り付け可能な分光ユニットの構成。

分光ユニットは任意の天体望遠鏡と接続可能である。天体望遠鏡からの入射光は、ビームスプリッターにより2つに分岐され、一方が分光器に接続されているファイバー、もう一方が CCD (ORION 社 STARSHOOT G3) カメラへと導かれる。ビームスプリッターの分割比は透過 90%, 反射 10% であり、入射光の大部分が分光器 (浜松ホトニクス C10083CAH) へ導かれる。この光学配置によりファイバーへ入射する光は CCD カメラの素子中心に集光される光と同一の方向から入射してきたものであるとみなすことができる。実際には、CCD カメラの素子中心とファイバー端面の中心は、それぞれのパーツの取り付け誤差やビームスプリッターの角度ずれなどの影響で、完全には一致しない。

\* 明治大学理工学部 Meiji University, Graduate School of Science and Technology, Kawasaki

\*\* 月惑星研究会

\*\*\* 川崎市青少年科学館 (かわさき宙と緑の科学館) Kawasaki Municipal Science Museum

したがって、ファイバーに入射する光が、CCD 素子内のどの位置に集光される光と同じ方向から入射したものであるかを、4 で述べる較正実験により対応付けさせる必要がある。

### 3. 較正実験 1: 分光感度特性の測定

分光器によって得られる分光スペクトルは、各波長に対応したデジタルカウント (16bits) の値としてデータ収録用の PC へ出力される。このカウント値は分光器の検出素子 (CCD) の量子効率、光学系の透過特性などによって決まる値で、その波長間強度比は観測対象の実際の分光スペクトル形状を反映していない。本研究では木星表面構造の色合いや反射率を知るうえで、分光器によって得られた分光データを、絶対輝度値へ換算する分光感度特性の情報が不可欠となる。そこで、かわさき宙と緑の科学館所有の 40 cm 望遠鏡と前述の分光ユニットを組み合わせた観測システムの総合分光感度特性を以下の手順で測定した。

- 1) 国立極地研究所所有の積分球標準光源システムによって波長感度特性が較正された分光器 (集光レンズ、および 400  $\mu\text{m}$  の径を持つファイバーによって構成されるシステム: 以下、較正済み分光器) を用意。
- 2) 較正済み分光器と、40 cm 望遠鏡、 $\times 2$  バローレンズ、および分光ユニットを接続した観測システムの視野を晴天時の昼間に天頂方向に向ける。
- 3) 較正済み分光器→観測システム→較正済み分光器の順に天頂方向の青空の分光データを取得する。
- 4) 較正済み分光器で得られた 2 回分の分光データを平均し、当日における青空の絶対分光放射輝度の値  $I_{sky}[W/m^2 \text{ str nm}]$  を得る。
- 5) 観測システムによって得られた分光スペクトルのデジタル値を、露光時間で割ることによ

り単位時間あたりのカウント値  $I[\text{counts/sec}]$  に換算し、 $S = I/I_{sky}$  により、観測システムの分光感度特性

$$S[(\text{counts/sec})/(W/m^2 \text{ str nm})]$$

この手順によって得られた観測システムの分光感度特性を図 2 に示す。

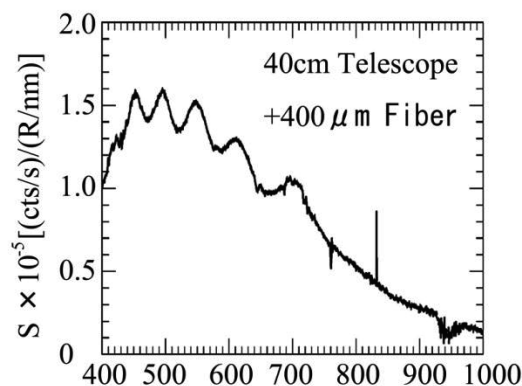


図 2. 青空の測定によって得られた観測システムの分光感度特性. 950 nm 付近の感度値は水蒸気による吸収のため不確定性が大きいので注意。

この較正データを用いることにより、観測システムによって得られた木星表面上のカウント値を絶対分光放射輝度値  $[W/m^2 \text{ str nm}]$  に換算することが可能となる。なお、図 2 では面発光体の分光輝度を表す R (レイリー) と呼ばれる単位を用いて感度 S が表されているが、式

$$S[(\text{counts/sec})/(W/m^2 \text{ str nm})] = S[(\text{counts/sec})/(R/nm)] \times \frac{1}{6.326 \times 10^{-6} \lambda}$$

により、 $[W/m^2 \text{ str nm}]$  を用いた感度値に換算が可能である。なお、式中の  $\lambda$  は nm 単位で表された波長を示す。

### 4. 較正実験 2: CCD イメージと分光範囲の対応

ファイバーに入射する光が、CCD 素子内のどの位置に集光される光と同じ方向から入射したものであるかを対応付けるために、実験室においてコリメーターを用いた較正実験を行った。実験は、

ハロゲン光源、ファイバーおよびカセグレン式小型望遠鏡 ( $f=1190$  mm) を用いたコリメーターによって疑似星像を作り、20 cm シュミットカセグレン式望遠鏡、 $\times 2$  バローレンズ、および分光ユニットを接続した観測システムで撮像することで行った。観測システムの CCD カメラにコリメーターからの点像が撮像されていることを確認し、望遠鏡への入射角を変ることで点像の撮像位置を変化させながら、分光器の受信信号レベルを測定した。

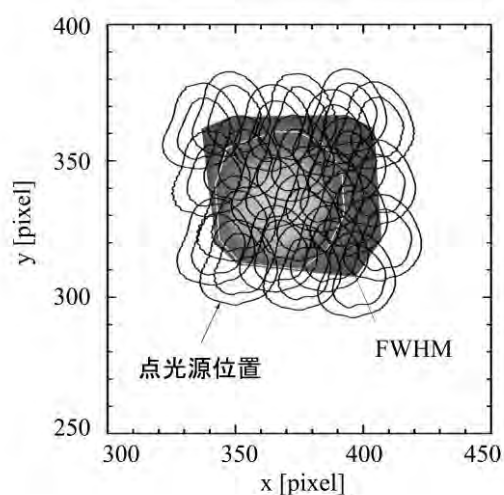


図3. コリメーターによる点光源の CCD による撮像位置 (等高線) と分光器からの信号強度 (グレースケール)。白線で示した範囲が分光器からの信号強度の最大強度に対する半値幅 (FWHM) を示しており、分光範囲と定義している。

図3で同心円状に表われている信号強度分布が各点像の位置を表しており、グレースケールで表示されている強度分布が点像の各位置に対応した分光器の信号レベルである。図中の白い線が、信号レベルの最大値に対して半値幅の範囲を示しており、ここではこの範囲を分光範囲と定義する。この実験により、CCD 座標上で  $x=366$  [pixels],  $y=337$  [pixels] 付近に分光範囲の中心があり、その半値幅は 50 ピクセル程度であることが確認された。分光ユニットに用いている CCD カメラの素子ピッ

ちは水平方向に  $8.6 \mu\text{m}$  であるので、この分光範囲は直焦点面において  $50[\text{pixel}] \times 8.6[\mu\text{m}] = 0.43[\text{mm}]$  の距離に相当する。40 cm 望遠鏡の焦点距離は  $f=4,800$  mm であるので、 $\times 2$  バローレンズを付けた場合、この像距離に対応する視野角は  $9.2''$  arcsec である。木星の視直径が  $32''$  から  $49''$  で推移するため、この分光範囲は木星視直径の  $1/3.5$  から  $1/5.3$  に対応する。GRS の視直径は経年変化するが、大まかに直径が 2 万キロ程度と仮定すると、その視直径は 5 秒程度となる。したがって、現在の構成であると、木星面の縞模様などを空間分解して分光観測することは可能であるが、GRS を完全に分解するためにはさらなる空間分解能の向上が必要となる。

## 5. 観測の初期結果

本研究で開発した分光ユニットと 40 cm 望遠鏡を組み合わせて木星観測を実施しデータが得られたのは、2015 年 12 月 16 日、2016 年 5 月 12 日および 5 月 19 日の 3 晩である。しかしながら、最初の 2 晩については試行錯誤の途中であり、観測システムが本論文で述べられているものと厳密には異なるため、ここでは 2016 年 5 月 19 日のデータのみ報告する。図4はこの晩の 20:24JST に得られた木星赤道帯 (EZ: Equatorial Zone) 付近のスペクトル例である。値は図2に示した分光感度特性を用いて絶対輝度値に変換してある。このような絶対輝度値が得られれば、国際照明委員会 (CIE) が定義する等色関数を用いて色度座標値 ( $x, y$ ) を計算することが可能である (Wyszecki, 1982)。この解析法は、可視域のスペクトル情報を人間の目で見える色彩に対応させる手法であり、色を定量化できるだけでなく、観測対象が色を変化させたとき、その変化を色度図上にプロットすることにより、その変化の原因となった色の成分について明確に推定することができる。木星表面で実際観測され

た色の変化に対して、ある色味を加色、あるいは減色することによってその変化を再現することができる、といった情報が得られれば、未知の着色物質を持つべき分光アルベドの波長分布を制約できる可能性がある。

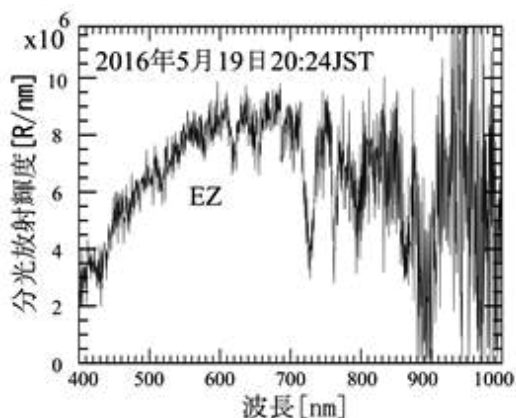


図4. 2016年5月19日20:24JSTに取得された木星赤道帯(EZ)付近の絶対分光放射輝度値。

図5は2016年5月19日の晩に得られた、各表面構造について上述の色度座標を計算し、色度図上にそれぞれプロットしたものである。複数種のプロットシンボルは各模様に対応しているが、それぞれの模様について2つの異なる時間帯に得られたデータをプロットしてある。時間帯によって同じ模様でも色度座標が異なるのは木星の高度角が変化することによって、地球大気の消散の効果が変化するためである。すべての模様について、色度図上で左下および右上というデータ組が存在するが、左下に分布しているデータがより高高度角で取得されたデータである。この事は、周知のとおり低高度角で天体を観測すると地球大気の消散により、赤みを帯びて観察される現象(夕日など)を示している。同図には、比較のため先行研究(Ordóñez-Etxeberria *et al.*, 2016)によって得られている木星表面上の代表的な模様の色度座標の範囲を灰色の陰影として示してある。

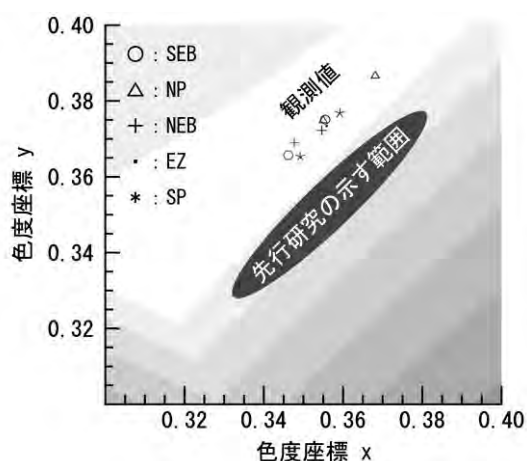


図5. 2016年5月19日に観測された各木星表面構造の分光放射輝度値に基づいて計算された色度座標および先行研究(Ordóñez-Etxeberria *et al.*, 2015)との比較(グレーの陰影部)。

## 6. 考察および今後の展望

図5に示したように40 cm望遠鏡と本研究で開発した分光ユニットを組み合わせた分光装置によって、木星表面構造の分光観測および色度の定量化に成功した。しかし、得られた結果は先行研究(Ordóñez-Etxeberria *et al.*, 2016)によって得られている各表構造の色度範囲から、わずかにオフセットしている。この原因については、以下の3通りの可能性を検討している。

- 1) 本研究は地上観測であり、地球大気の消散の影響を受けたデータである。一方、先行研究はCassini探査機が木星にフライバイした際に近接撮像したマルチバンド画像を元に計算された値であり、地球大気の影響は受けていない。
- 2) 先行研究による観測は2000年12月に行われたものである。一方我々の結果は2016年5月19日の結果である。16年の年月によって木星表面構造の色度に実際に変化が起こった。
- 3) 先行研究による解析は、前述のとおりマルチバンド画像に基づいて行われている。これは、ある中心波長および帯域幅を持ったフィルターを通し

た単色画像を複数枚組み合わせた解析であり、本研究の連続的なスペクトルに基づいた厳密な色度解析とは異なる。

原因候補 1) に関しては、この補正を行った場合に期待できる色度図上での変化方向から、両者の色度差を説明するメカニズムとしては考えにくい。今後様々な条件で得られたデータを時系列で比較する上で重要な補正であるので、現在観測当日における大気消散係数を、観測によって導出する手法を開発中である。原因候補 2) については、最も興味深い結果であるが、装置特性による原因候補 3) によってもたらされる不確定性を評価してから初めて議論が可能であると考えている。したがって、現在は 3) について可能性を究明している。

## 謝辞

本観測的研究の実現は、かわさき宙（そら）と緑

の科学館の職員方の熱心な観測指導および観測支援によるところが大きい。

## 7. 参考文献

- Ordóñez-Etxeberria, I., Hueso, R., Sánchez-Lavega, A., & Pérez-Hoyos, S., 2016. Spatial distribution of jovian clouds, hazes and colors from Cassini ISS multi-spectral images. *Icarus*, **267**: 34-50.
- Sánchez-Lavega, A., Legarreta, J., García-Melendo, E., Hueso, R., Pérez-Hoyos, S., Gómez-Forrellad, J. M., & Irwin, P., 2013. Colors of Jupiter's large anticyclones and the interaction of a Tropical Red Oval with the Great Red Spot in 2008. *Journal of Geophysical Research: Planets*, **118**(12): 2537-2557.
- Wyszecki, G., & W. S. Stiles, (1982). *Color science*, Vol. 8. Wiley, New York.

