

多波長分光撮像・偏光観測による
木星極域雲・ヘイズの特徴

横田 駿太郎

北海道大学 大学院 理学院 宇宙理学専攻 惑星宇宙グループ

学生番号 20193088

2020年1月29日

概要

木星極域に存在する成層圏ヘイズはメタン吸収波長で明るく輝いており、どの波長帯においても粒子の多重散乱により高い偏光度を示す。ボイジャー探査機・ハッブル宇宙望遠鏡の観測からこのヘイズキャップは南半球において波構造を形成し、緯度 67° まで拡大していることが知られている [Sanchez-Lavega et al, 1998]。木星ヘイズのドリフト観測からヘイズの波構造が 0-10 m/s 程度の速度を持つ、惑星ロスビー波であることが示唆されている。 [Barrado-Izagirre et al 2003]。2011 年から 2015 年にかけて行われた地上望遠鏡での観測ではこの波構造が定常的に存在することが改めて確認されたほか、2 週間程度での変化が観測されておりヘイズ構造に影響を与える対流構造の存在が示唆された [合田 2016]。Juno 探査機は 57 日周期の木星極軌道からこれまで十分に観測されていなかった木星の両極域を観測し、探査機の周期をまたぐ寿命を持つ定常的なサイクロンが緯度 80° の領域に存在することを明らかにした [Tabataba-Vakili, 2020]。JunoCam が提供する画像は RGB カラーであるためメタン吸収波長で明るく輝くヘイズを直接確認することはできないが、地上観測との連携によって新しく観測されたサイクロンがヘイズの構造の形成・維持に与える影響を明らかにすることが期待できる。偏光観測は惑星表層や大気粒子特性の決定に有効な手法であり、木星の大気ダイナミクスと粒子種の特定を目的とした偏光観測が 1920 年代より多く行われてきた。地上からの観測では、木星の偏光度は極域で 10% 程度の高い値を示す一方で、赤道に近づくにしたがってコンマ数%まで低下する。この極域の高い偏光度は波長によらないことから高高度に存在するヘイズ粒子の多重散乱によるものであると考えられている。波長毎の特性として、これまでの分光偏光観測の結果から木星の偏光度はメタン吸収波長で高い値を示すことが判明している [Schmid et al, 2011]。地上観測では位相角が 12° 程度に制限されるため観測される偏光度は低くなるが、Pioneer 探査機による位相角 90° からの観測では B, R バンドにおいて極で最大 50%、赤道域で 10% の高い偏光度が観測された [Smith et al, 1984]。観測された偏光度からは散乱光強度の情報を得ることができ、モデル計算と合わせることで粒子特性に制約を与えることができる。近年では新しく発見されたホットジュピターなど木星クラスのサイズ・質量をもつ系外惑星の大気組成を解明するための観測が盛んにおこなわれており、同じくガス惑星である木星の偏光観測はその比較先として注目されている。メタン吸収波長における分光撮像によるヘイズ波構造の追跡と合わせて偏光撮像観測を行うことで対流圏からの粒子の巻き上げの有無を明らかにすることが期待できる。これまでの木星偏光観測はスリット分光による広域の偏光分光観測、R,V,B バンドの広帯域波長フィルターを用いた偏光撮像観測が主であり、極域ヘイズの空間分布に注目した偏光観測は十分に行われていない。また、これまでの木星偏光観測は年に数回程度の頻度であり短期間の時間変動を議論するための偏光撮像データは不足している。北海道大学の所有する 1.6 m ピリカ望遠鏡と MSI(可視マルチスペクトル撮像装置) は豊富なマシンタイムを有し、観測時間の確保の問題から探査機や大型の地上望遠鏡では難しい数日、数週間程度の短期間に連続した観測に強みを持つ。

本研究では MSI に備わっている液晶可変フィルターを直線偏光子として活用することで半値幅 10 nm 程度の分光撮像観測と撮像偏光観測を同時に行う。極域ヘイズの時間変化と偏光度分布の時間変化を比較し、特定高度に注目した偏光度の時間変化を明らかにすることで、輝度的に安定している領域の粒子特性の変化の有無を明らかにし、ヘイズ層の形成と維持のメカニズムに迫る。今回、2020 年 7 月から 10 月までピリカ望遠鏡を使用した木星分光撮像観測と偏光撮像観測を行い、21 夜の観測で数日間の連続したデータと 1 週間以上間の空いたデータを取得した。典型的なシーイングサイズは 2-3 秒角であった。

分光撮像観測の結果からは 7/15,7/29-7/30,8/2 において南極域に存在するヘイズの波構造が数日程度維持されていることが確認された。889 nm で観測される最も上層のヘイズ構造は 727 nm,619 nm においても共通した波形が見られることもある。より深い層の波形になるほど共通性が失われる傾向があることから木星大気上層における対流構造は 1 bar より上層でのみ影響を及ぼしていることが示唆された。測定された装置光学系の器械消偏光の値は 800 nm 以上の波長で著しい現象を起こしており、889 nm の偏光撮像観測結果は信頼性に乏しく参考程度にとどめる必要がある。高緯度域の偏光度の値は先行研究の値と比べて低く出ており経度方向の変動も 0.1% 程度にとどまっていた。先行研究で見られた雲頂高度に対応すると考えられる緯度方向の偏光度変動が全ての観測波長で経度方向にも認められた。より高い領域で散乱された光がメタンの吸収の影響をより受けにくくなると考えるとこの傾向の説明がつくため偏光度を用いて周辺領域と比較した粒子特性の変化の有無を議論する際にはフラックスの強度を考慮に入れる必要があると考えられる。

目次

1	Introduction	3
1.1	木星の概要	3
1.2	木星極域ヘイズ	6
1.3	粒子による偏光	7
1.4	木星の偏光観測	8
1.5	研究目的	10
2	Observation&Method	11
2.1	ピリカ望遠鏡	11
2.2	MSI(Multi-Spectrum Imager)	13
2.3	木星観測	14
2.4	偏光効率測定	17
2.5	偏光標準星観測	18
3	Analysis	19
3.1	irafによる一次処理	19
3.2	MATLABによる処理	20
3.2.1	模擬画像作成	20
3.2.2	位置合わせ	22
3.2.3	木星経度輝度プロファイルの作成	23
3.2.4	装置偏光パラメータ取得	28
3.2.5	木星経度偏光度プロファイルの作成	34
4	Results	35
4.1	木星分光撮像観測	35
4.2	木星偏光撮像観測	39
5	Discussion	41
5.1	木星分光撮像観測によるヘイズ波構造	41
5.2	分光撮像観測と偏光撮像観測の比較	42
6	Summary	42
7	Aknowledgements	43
8	References	43

1 Introduction

1.1 木星の概要

木星は太陽系最大のガス惑星の1つであり、地球の外を公転する外惑星である。木星は固体の地表面を持たない。木星は地球の地球のおよそ318倍の質量を持つ一方で密度は地球の24%程度と小さく、水素、ヘリウムを主とする厚い大気が体積の大部分を占める。そのため可視光・近赤外で見える表層は地球型惑星の大気と大きく異なる。木星における大気現象は地球サイズの数倍の直径をもつ高気圧である大赤斑を始めとして非常に大きなスケールを持つものが存在する。このため木星大気の研究は太陽系の天体の特性を統一的に理解することを試みる比較惑星学の観点から重要であるだけでなく、近年観測が大きく進んでいる系外惑星、特に観測難易度の問題から比較的多い割合で発見されている木星サイズのガス惑星、ホットジュピターの大気を理解する上でも重要な手掛かりとなる。表(1)に木星の概要を示す。本研究では木星の経緯度を表示する際、磁場の自転を基準とした座標系を使用する。

表 1: 木星の諸元 [15]

	木星	地球
赤道半径 (km)	71492	6378
質量 (g)	1.90×10^{30}	5.97×10^{27}
赤道半径 (g/cm^3)	1.33	5.51
公転周期 (yr)	11.86	1
自転周期 (h) (System III)	9.9247	23.928
軌道長半径 (AU)	5.2026	1
軌道離心率 ($^\circ$)	0.0485	0.0167
軌道傾斜角 ($^\circ$)	1.3029	0.0026
赤道傾斜角 ($^\circ$)	3.1	23.44
大気組成	H ₂ (86.4%), He (13.6%) CH ₄ (0.2%), NH ₃ (0.007%)	N ₂ (78.08%), O ₂ (20.95%) Ar (0.93%), CO ₂ (0.04%)

木星大気は表(??)に示される温度の鉛直分布を持つ。0.1 bar 付近を境に温度勾配の符号が切り替わり、下層では温度変化は断熱変化に近くなる [16]。1 bar より深い層では大気中に含まれるアンモニア化合物、メタン、水分子が凝結することで雲を生成し、可視光で見える色を形成する。

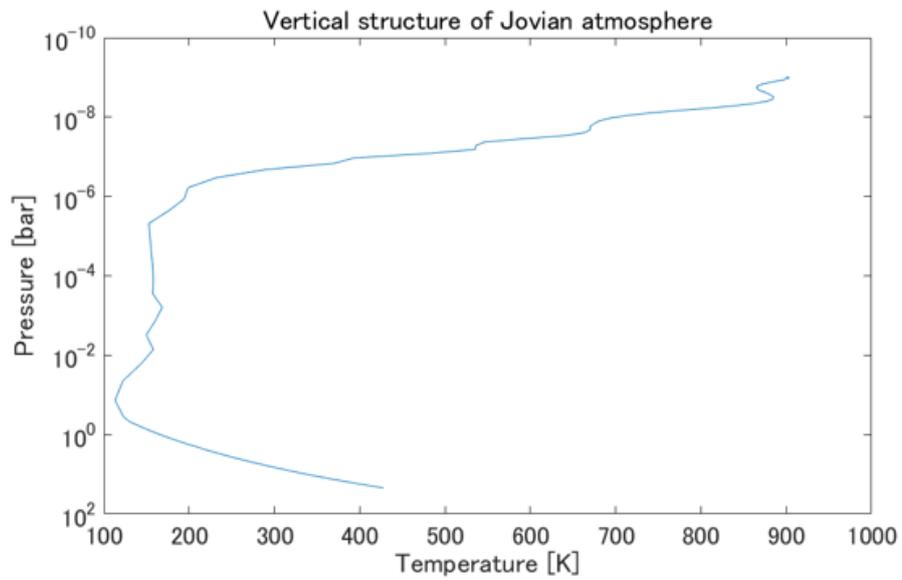


図 1: 木星大気温度の鉛直分布 [N. Barrado-Izagirre et al, 1998][7]

木星を可視光で観測すると白色の Zone(帯) と褐色の Belt(縞) からなるバンド構造が卓越している。それぞれ高気圧帯と低気圧帯であり、その境目が図 (2) に示す東西風速度分布に対応する。これは図 (3) に示すように低気圧帯の上昇流から駆動されると考えられている。

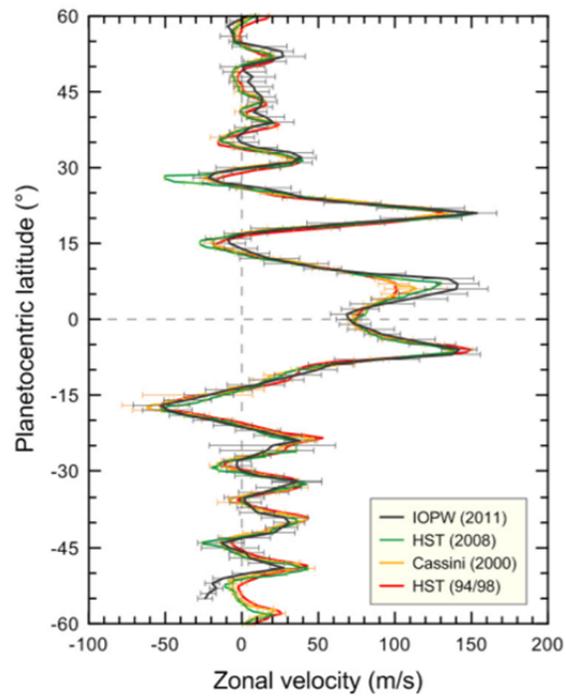


図 2: 木星大気温度の東西風分布 [A. Seiff et al, 1998][?]

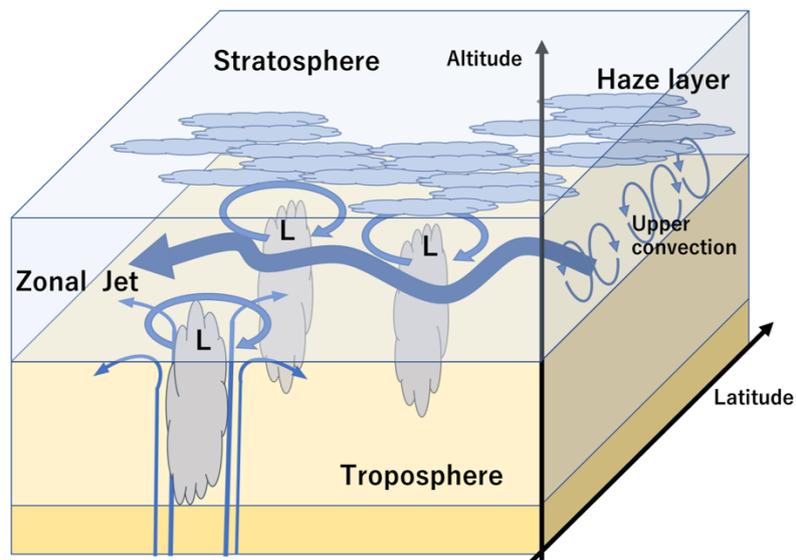


図 3: 木星大気の概観

1.2 木星極域ヘイズ

木星の対流圏上部から成層圏下部にかけては芳香族炭化水素やメタンからなるサブミクロンサイズの粒子であるヘイズが層を形成している。このヘイズ層は極域で特に顕著に見られ、メタン吸収波長で見ると明るく輝く領域として捉えることができる。メタン吸収波長を用いることで反射光の光路差から対流圏上部から成層圏までの特定高度に感度を得ることができる [Karkoschka et al., 1994]。最も吸収の強い 889 nm は 0.3 bar より浅い成層圏上部、弱い吸収の 727 nm, 619 nm は 1 bar 程度の対流圏上部、連続波長である 756 nm は 10 bar 程度の深さに感度を持つ。図 (4), 図 (5) にハッブル宇宙望遠鏡で観測された木星南極域のヘイズ構造とその時間変化を示す。これまでのヘイズ構造の時間変化から背景の速度が計算されたことによりヘイズ構造が惑星ロスビー波であることが示唆されている。2011 年から 2015 年にかけて行われた地上望遠鏡での観測ではこの波構造が定常的に存在することが改めて確認されたほか、2 週間程度での変化が観測されておりヘイズ構造に影響を与える対流構造の存在が示唆された [合田 2016]。

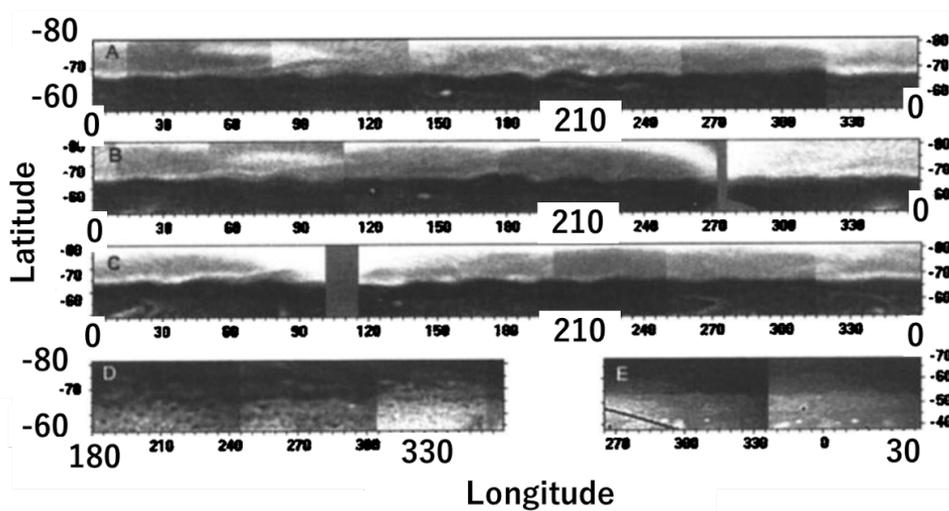


図 4: 木星極域ヘイズ波構造 (889 nm). [A. Sanchez-Lavega et al, 1998]

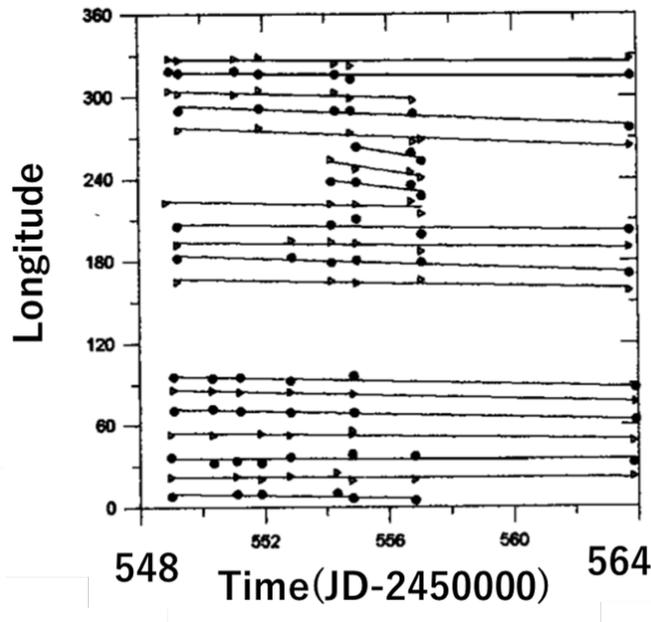


図 5: 木星極域へイズ波構造の経度ピーク時間変化 [A. Sanchez-Lavega et al, 1998]

1.3 粒子による偏光

光を表す電磁波の振動方向は、光の進行方向に垂直である。この振動方向が特定の方向に偏っている状態を偏光という。太陽光など、黒体放射で表されるような光は、様々な振動方向を持つ光が均等に集まっているため、絶えず振動方向がランダムに変化している。このような自然光の状態を、無偏光という。一方、太陽光を反射している惑星の光は、惑星表面、あるいは大気中の粒子によって散乱された太陽光を含むため、偏光している。偏光の強度、すなわち散乱強度は方向と波長への依存性を持つ。地球大気で見られるレイリー散乱は粒子サイズが波長と同程度の際に発生する、等方的な散乱である。もう一つの代表的な散乱であるミー散乱では、波長の十倍程度大きい粒子が前方散乱を起こす。このように散乱の度合いは粒子の形状、サイズ、組成に大きく関係している。

直線偏光とは電場の振動方向を基準面に沿って2つに分解したとき、位相差無しで振動している状態を指す。そのため直線偏光している電磁波の振動方向いつも同じ面にある。2つに分解した振動の位相差が合わない場合、電磁波の振動方向は時間的に変化する。この状態を楕円偏光といい、特に位相差が $\pi/2$ の状態を円偏光という。光の偏光を表すパラメータとしては、ストークスパラメータがよく用いられる。ストークスパラメータは全フラックス I 、直線偏光成分 Q 、 U 、円偏光成分 V から成る。 Q は垂直成分に対する水平成分の優位性を、 U は 45° 傾いた基準面における垂直成分に対する水平成分の優位性を示す。ストークスパラメータの意味を視覚的に表したものが以下の図(6)である。

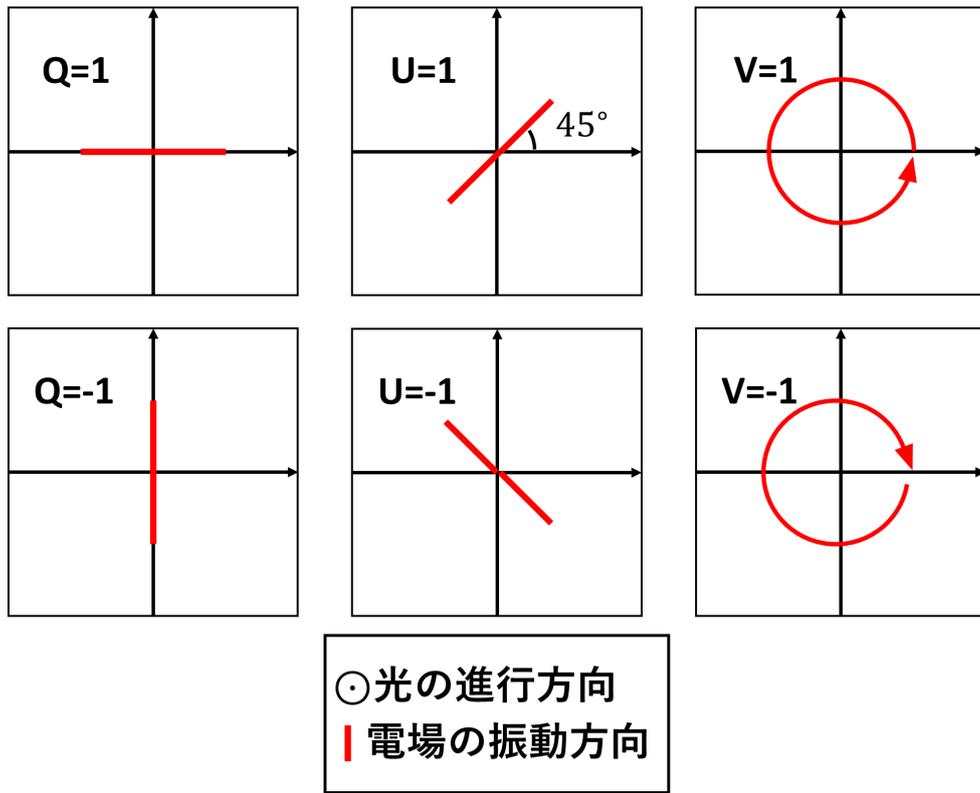


図 6: ストークスパラメータと電場の振動方向

1.4 木星の偏光観測

偏光観測によって得られる偏光度は天体表面の粒子特性を反映しており、観測波長と天体・太陽・地球がなす角度(位相角)の関数となる。このため偏光観測は天体の大気組成を解明する手法の一つとして地上観測・探査機によって行われてきた。近年ではホットジュピターなど木星クラスのサイズ・質量をもつ系外惑星の大気組成を解明するための観測が盛んにおこなわれており、同じくガス惑星である木星の偏光観測はその比較先として注目されている。2014年から2015年にかけて行われた McLean らの木星偏光観測では初めて詳細な面分解を可能とした偏光撮像観測が行われた。図(7)に見られるように特に短波長のBバンドではレイリー散乱を由来すると考えられる偏光度変化をバンドにわたって確認することができる。

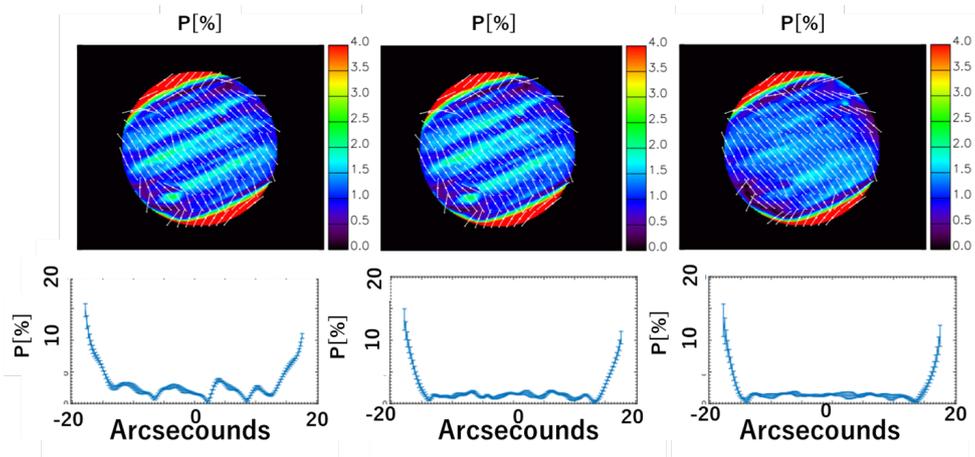


図 7: 広帯域フィルターによる木星偏光撮像観測 [W. McLean et al, 2017]. 右から B,V,R バンド. 下はそれぞれの中央子午線の偏光度プロットを示す.

木星の分光偏光観測は McLean らの他に Schmid らがスリット観測を行っている. これらの先行研究ではメタン吸収波長における偏光度の増加を示しており, 上層のヘイズ粒子の散乱が偏光度に寄与していることが示唆されている. いずれの偏光観測でも経度方向の変動にはあまり注目していない. また, これらの偏光観測は年に数回程度の頻度でしか行われておらず, 先行研究見られた偏光度分布が時間変動を明らかにするためには短期間に連続した面分解ができる詳細な観測が求められる.

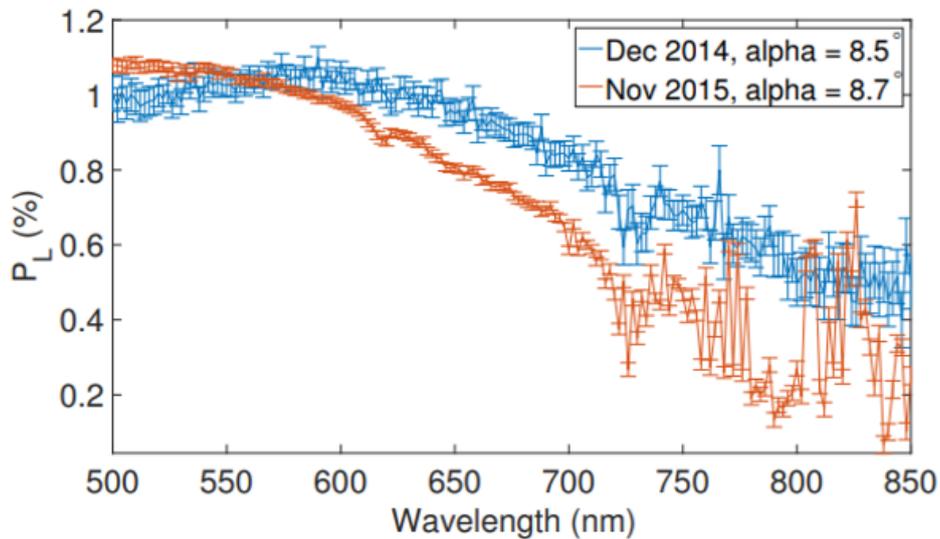


図 8: 木星偏光分光観測結果 [W. McLean et al, 2017].

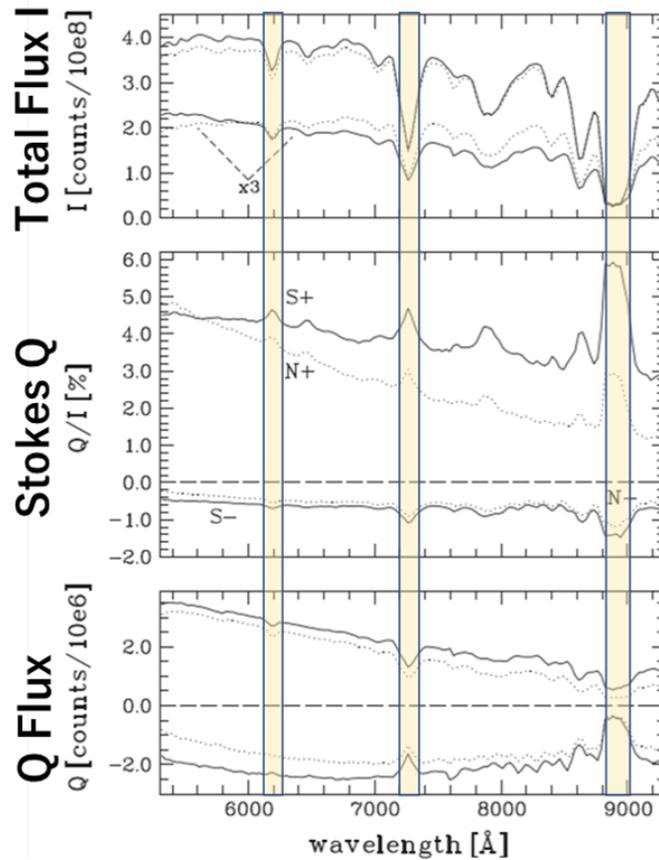


図 9: 木星偏光分光観測結果 [H. M. Schmid et al, 2011]. 上からフラックス強度, 偏光度 (ストークスパラメータ Q), Q 成分のフラックス強度を示す. 色づいている部分はメタン吸収波長の場所を示す.

1.5 研究目的

本研究では分光撮像・偏光撮像の2つの手法によって極域ヘイズの波構造を追跡し、極域ヘイズの波構造の寿命や構造を生成する対流構造の有無を明らかにすることを目的とする。これまでの観測では極域ヘイズの波構造は定常的に存在していることが確認されているが、2週間程度での構造変化も観測されており、その生成・維持のプロセスは明らかになっていない。ヘイズの波構造に影響を与える要因として対流雲の発生、小天体の衝突、磁気圏の活動が考えられるがこれらの要因とさらなる観測が必要である。北海道大学の所有する 1.6 m ピリカ望遠鏡と MSI(可視マルチスペクトル撮像装置) は観測時間の確保の問題から探査機や大型の地上望遠鏡では難しい数日、数週間程度の短期間に連続した分光撮像観測を行うことが可能である。木星の偏光度は極域で 10% 程度の高い値を示す一方で、赤道に近づくにしたがってコンマ数%まで低下する。この極域の高い偏光度は波長によらないことから高高度に存在するヘイズ粒子の多重散乱によるものであると考えられてい

る。波長毎の特性として、これまでの分光偏光観測の結果から木星の偏光度はメタン吸収波長で高い値を示すことが判明している [Schmid et al, 2011]。McLean (2017) らの分光撮像観測によって初めて面分解が可能な詳細な偏光度分布が示され、縞構造に対応した緯度方向の偏光度変化と短波長側における偏光度の特徴から偏光度の変化が大気中の水素分子のレイリー散乱に多く起因することが確認された。しかし観測波長の幅が 100 nm 以上と広く、対流圏上部から成層圏下部における特定高度に感度をもつメタン吸収波長における偏光度特性を議論することは難しい。また、McLean らが行った詳細な偏光撮像観測は年に数回程度の観測にとどまっており数日、数週間程度の変動を議論するためのデータは十分に得られていない。本研究の観測では MSI に備わっている液晶可変フィルターを直線偏光子として活用することで半値幅 10 nm 程度の狭帯域偏光観測を複数の波長を用いて数日間隔の高頻度で行う。この撮像偏光観測によって、先行研究の観測波長、頻度では観測が難しい極域のヘイズの偏光度変化を追跡することが可能である。本研究では分光撮像観測と同時に行う撮像偏光観測により極域ヘイズの時間変化と偏光度分布の時間変化を比較し、特定高度に注目した偏光度の時間変化を明らかにすることで輝度的に安定している領域の粒子特性の変化の有無を明らかにし、ヘイズ層の形成と維持のメカニズムに迫る。

2 Observation&Method

2.1 ピリカ望遠鏡

ピリカ望遠鏡は北海道大学が有する光学赤外線天体望遠鏡である。主鏡直径は 1.6 m で、惑星観測を目的として設置された望遠鏡としては最大級の大きさを持つ。望遠鏡は北海道名寄市に設置されており、東経 145° 北緯 44°、標高 151 m に位置する。表 2 に望遠鏡の仕様を示す。

表 2: ピリカ望遠鏡仕様

光学系	リッチー・クレチアン
焦点	カセグレン × 1, ナスミス × 2
主鏡有効径	1600 mm
合成焦点距離	19238 mm (F/12.0)
視野 (カセグレン)	直径 20 arcmin



图 10: 天文台外觀



図 11: ペリカ望遠鏡

2.2 MSI(Multi-Spectrum Imager)

本観測では MSI(Multi-Spectrum Imager) を使用して木星観測を行った。MSI は、ペリカ望遠鏡カセグレン焦点に設置された観測装置で、EMCCD カメラと LCTF(Liquid Crystal Tunable Filters) の組み合わせによって素早くマルチスペクトル撮像を行うことができる特徴を持つ。LCTF は 2 つの偏光素子に挟まれた液晶に電圧をかけることで特定の波長に感度をもつ透過特性を得ることができる。この透過波長の切り替えは数秒程度で完了することができ、フィルターホイールと比べて高速で観測波長を切り替えることができる。MSI は可視 (400-720 nm) と近赤外 (650-1100 nm) の観測が可能な 2 つの LCTF を備える。表 3 に装置の仕様を示す。

表 3: MSI 仕様

波長域	360-1050 nm
視野	3.3 × 3.3 arcmin(0.389 arcsec /pixel)
フィルター ・液晶可変フィルター (VIS) ・液晶可変フィルター (SNIR) ・狭帯域フィルター ・広帯域フィルター	400-720 nm($\Delta\lambda = 10$ nm) 650-1100 nm($\Delta\lambda = 10$ nm) 365,656,777,889,1010 & 1100 nm U,B,V,Rc,Ic
検出素子	512 × 512pixel EMCCD
最大フレームレート	0.031s(EMCCD mode) 0.122 s(NormalCCD mode)

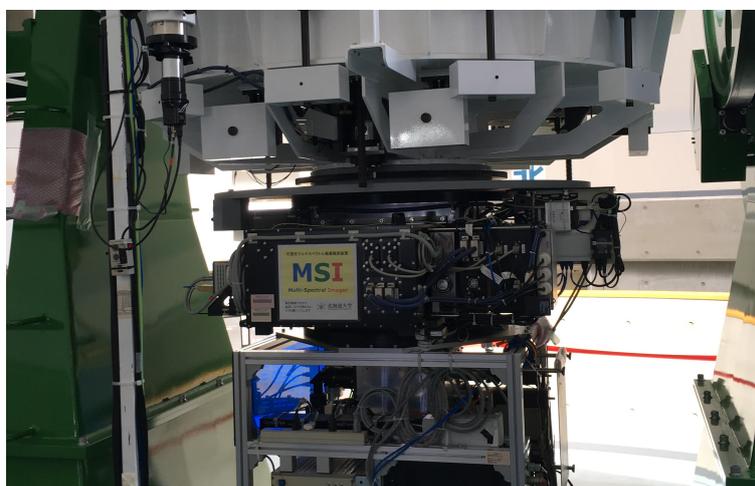


図 12: 装置外観

2.3 木星観測

本研究では木星の分光撮像観測と偏光撮像観測の2種類の観測を行った。どちらの観測も LCTF を使用した狭帯域の撮像観測である。LCTF は2つの偏光素子で液晶を挟む構造を持つため LCTF それ自体を直線偏光子としてみなすことができる。偏光観測を行うためには常光線、異常光線の強度を比較する必要がある。そのため光路上に一方の電磁場の位相を半波長分遅らせる特性をもつ半波長板を挿入し、半波長板の回転角度を 0° , 45° , 22.5° , 67.5° に設定してそれぞれ5枚1セットの画像を取得した。これにより入射光をそれぞれ 0° , 45° , 22.5° , 67.5° 回転させた時と同じ光が LCTF に進入するため、偏光度の測定に必要な常光線、異常光線を取得することができる。この常光線と異常光線の差分をとることで入射光の偏光状態を示すストークスパラメータを計算することができ

る. 詳細な計算方法は Analysis の章に示す. 本研究では偏光撮像観測で取得した常光線の画像データと半波長板を用いずに撮像した画像データ双方を分光撮像データとしてヘイズ波構造の解析に使用する. 観測を行った際には各観測の設定に合わせてバイアスフレームとフラットフレームを取得した. バイアスフレームはアパーチャーを閉じて CCD に光がまったく当たらない状態にした上で最小露光で 10 枚撮像して取得する. フラットフレームはドーム内に取り付けられたフラット板とフラットランプを利用し, CCD のリニアリティを最大に活用できるカウントを得ることができる露光時間に設定して各設定で 5 枚ずつ画像を取得した.

表 4 に観測の概要を示す.

表 4: 観測概要

観測日	観測波長	視直径 (")	Seeing Size (")	位相角 (°)	Exp time (s)
2020/7/15	889, 727, 619, 756	47.6	2.95	0.3	8, 2, 1, 0.488
2020/7/17	889, 727, 619, 756	47.6	2.97	0.7	8, 2, 1, 0.488
2020/7/20	889, 727, 619, 756	47.6	4.35	1.3	8, 2, 1, 0.488
2020/7/29	889, 727, 619, 756	47.3	3.32	3.2	8, 2, 1, 0.488
2020/7/30	889, 727, 619, 756	47.2	2.55	3.4	8, 2, 1, 0.488
2020/8/02	889, 727, 619, 756	47.0	2.02	4.0	8, 2, 1, 0.488
2020/8/09	889, 727, 619, 756	46.6	2.68	5.3	8, 2, 1, 0.488
2020/8/17	889, 727, 619, 756	45.9	3.35	6.7	8, 2, 1, 0.488
2020/8/20	889, 727, 619, 756	45.6	3.02	7.2	8, 2, 1, 0.488
2020/8/22	889, 727, 619, 756	45.4	3.88	7.5	8, 2, 1, 0.488
2020/9/01	889, 727, 619, 756	44.3	2.81	8.9	8, 2, 1, 0.488
2020/9/02	889, 727, 619, 756	44.1	2.02	9.0	8, 2, 1, 0.488
2020/9/03	889, 727, 619, 756	44.0	2.10	9.1	8, 2, 1, 0.488
2020/9/09	889, 727, 619, 756	43.3	3.55	9.8	8, 2, 1, 0.488
2020/9/28	889, 727, 619, 756	40.9	3.15	11.0	8, 2, 1, 0.488



図 13: ピリカ望遠鏡で撮影した木星画像 (889 nm). 木星中央やや右上の光点は大赤斑, 木星外の光点はガリレオ衛星.

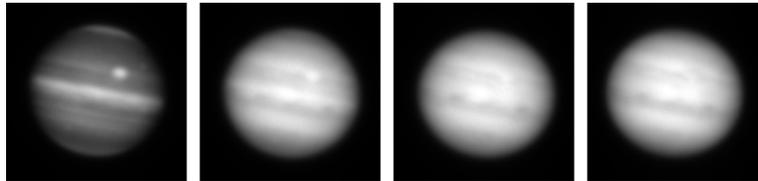


図 14: ピリカ望遠鏡で撮影した木星画像 (左から 889 nm, 727 nm, 756 nm, 619 nm). 画像は中心部 160 ピクセル四方の範囲をトリミングしている.

2.4 偏光効率測定

望遠鏡と観測装置中に存在する光学素子によって直線偏光成分の一部が円偏光に変換されることにより観測される偏光度が減少する器械消偏光の影響をドーム内に備えられたフラットランプを使用して測定する. 半波長板より主鏡側に直線偏光子を挿入することによって入射光を完全に偏光させた状態で偏光観測の手順を行うことにより測定される偏光度が器械消偏光の値となる.

2.5 偏光標準星観測

プリカ望遠鏡は経緯台式の追尾を行うため、望遠鏡の移動に伴って視野が回転する。この回転をキャンセルするためにカセグレン焦点に設置されているインストゥルメントローテーター全体が回転する。偏光観測を行う際、鏡の汚れに由来する装置偏光の偏光方向がインストゥルメントローテーターの回転とともに回転するため観測された偏光度からこの装置偏光を除く必要がある。装置偏光の値は偏光度が非常に小さい無偏光標準星を観測することによって観測される偏光度はインストゥルメントローテーター角度によって周期的に変化する。こちら木星観測と同様にバイアスフレーム、フラットフレームを取得した。

表 8 に観測した無偏光標準星を示す。

表 5: 無偏光標準星

標準星	赤経	赤緯	V mag	P (%)	θ (°)
Beta Cas	00h 09m 10.7s	+59° 08' 59"	2.3	0.04	72.5
Zeta Peg	22h 41m 27.7s	+10° 49' 53"	3.4	0.05	40.0

無偏光標準星の観測から求められたパラメータを用いることにより装置偏光を補正するが、このままでは装置系の偏光方向がどちらを向いているかわからない。そこで偏光方向が既知の強偏光標準星を観測し、観測された偏光度をカタログの値と比較することで装置座標系の偏光方向から天体座標系の偏光方向へ変換する。天体の直線偏光角 θ_p と観測された直線偏光角 θ_{obs} には以下の式 1 または 2 のいずれかの関係がある。 θ_{offset} は装置系の偏光方向である。

$$\theta_p = \theta_{obs} + \theta_{offset} \quad (1)$$

$$\theta_p = -\theta_{obs} - \theta_{offset} \quad (2)$$

表 9 に観測した強偏光標準星を示す。

表 6: 強偏光標準星

標準星	赤経	赤緯	V mag	P (%)	θ (°)
HD 7927	01h 20m 04.9s	+58° 13' 54"	5.0	3.32	92.1
HD 19820	03h 14m 05.4s	+59° 33' 48"	9.1	4.82	115.4

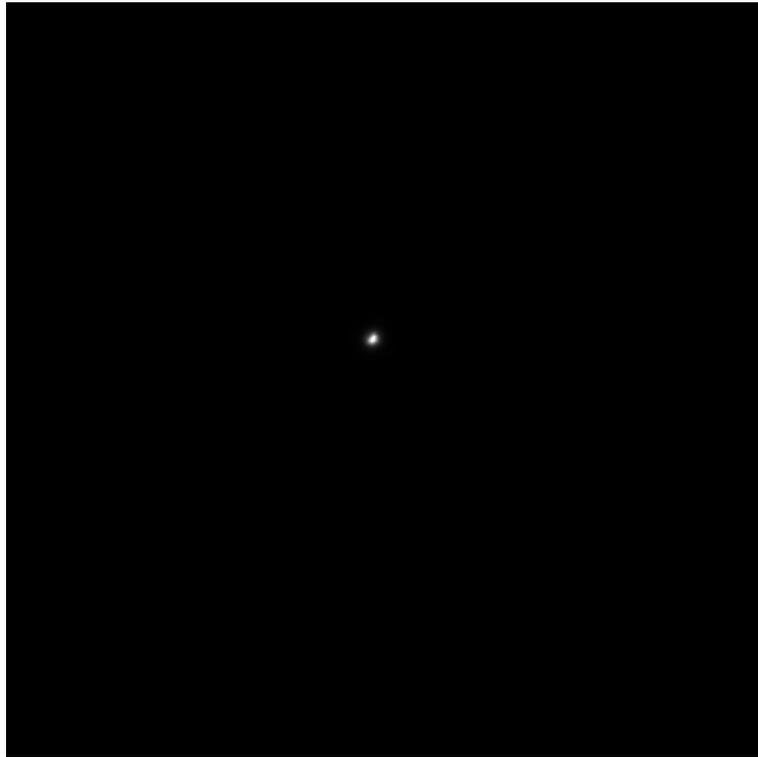


図 15: ピリカ望遠鏡で撮影した無偏光標準星 Beta Cas の常光線画像.

3 Analysis

本研究の解析では, 取得した画像データの一次処理に iraf を, それ以降の処理に MATLAB を利用した. この章では解析の流れを記述する.

3.1 iraf による一次処理

iraf による一次処理では観測装置由来のムラを補正する. 観測で取得された画像データには, bias と呼ばれるカウント値が観測対象からくる光による信号に足されているほか, 各ピクセル間の感度のムラが残っている. bias を除くために, bias 補正を, ピクセル間の感度ムラを補正するためにフラット補正を行う. バイアス補正では, CCD に光を阻止に当てない状態で最短露出時間で取得した bias フレームと呼ばれる画像 10 枚のカウント, 中央値でスタックしたフレームを作成し, 取得した火星画像から引き算を行うことで bias を除く. フラット補正では CCD が飽和しない程度に露出時間を調整した上で, フラットランプの光を当てたドーム内に設置された拡散版に望遠鏡を向けて取得したフラットフレームを使用する. 観測時と光学系の設定を同じにした上で, 5 枚ずつ取得したフラットフレームを bias を引いた後に中央値でスタックし, 規格化を行う. 規格化後のフラットフレーム

で bias 補正後の画像に割ることで感度ムラが補正される. 以上の操作をピクセル毎のカウンターの式で表すと以下ようになる.

$$\text{reducedImage} = \frac{\text{rawImage} - \text{biasimage}}{\text{flatImage} - \text{biasimage}}$$

3.2 MATLAB による処理

3.2.1 模擬画像作成

一次処理を施した画像に対し, 木星の緯度, 経度情報を取得するため, 観測時のパラメータから木星の模擬画像を作成した. パラメータの取得には太陽系天体の運行を表示する NASA の Web サイト, HORIZONS(<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>) を利用した. 取得したパラメータは, 木星-地球間の距離, 太陽直下点の経緯度, 観測直下点の経緯度, 視直径, 位相角, 見かけの地軸の傾きである. 緯度, 経度で表される木星中心を原点とする極座標系から, CCD の受光面と受光面に垂直な軸からなる xyz 座標系への変換を行う. 各ピクセル毎の緯度, 経度を計算し, 原点からピクセルに対応する経緯度へ向かうベクトル P と, 原点から太陽へ向かうベクトル L_s の内積と, 地球へ向かうベクトル L_e との内積がどちらも正になるピクセルの値を 1, それ以外を 0 にすることで, CCD 上で木星にあたる部分のみ 1 の値を持つ模擬画像を作成した. 模擬画像の例を図 (16) に, ピクセル毎の緯度経度を図示した画像を図 (17) に示す.

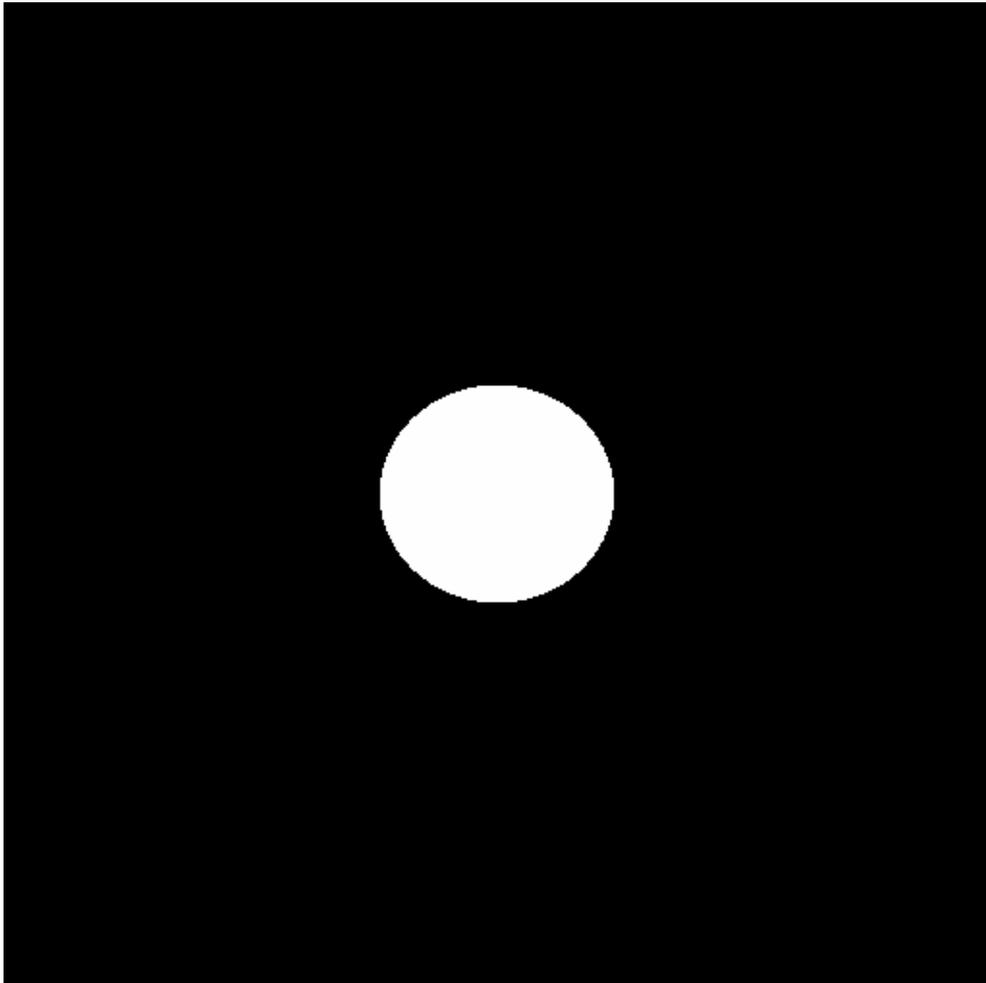


図 16: 位置合わせのための模擬画像

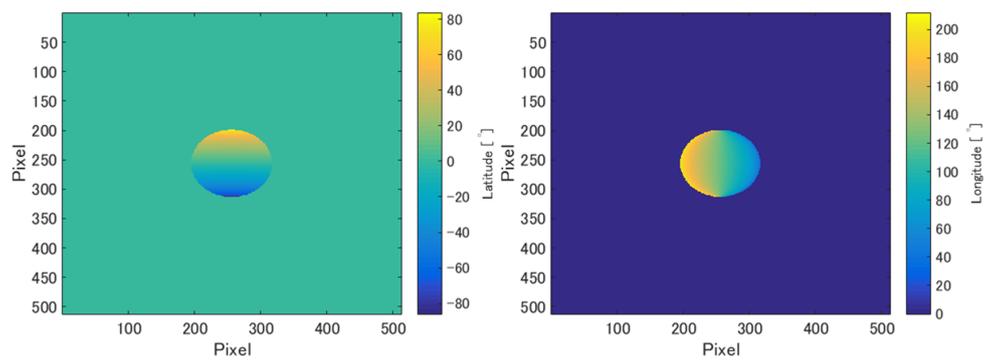


図 17: 左:木星緯度画像 右:木星経度画像

3.2.2 位置合わせ

作成した模擬画像を用いて、一次処理済みの画像の位置合わせを行った。作成した模擬画像を水平、垂直にそれぞれ1ピクセルずつシフトさせながらカウント値の合計を求め、合計が最も高くなったシフト量を適用して画像の中心を合わせた。シフト量とカウント値の関係を以下の図(18)に示す。観測データは同じ撮影条件で5枚連続取得したため全て同様に位置合わせの操作を行った上で重ね合わせた。

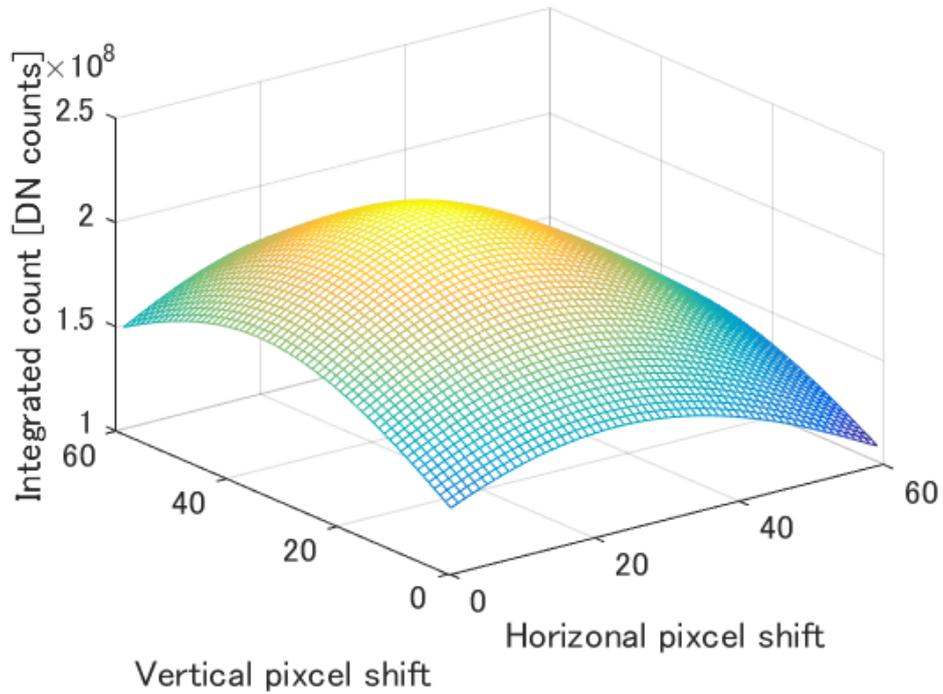


図 18: シフト量とカウント値の関係



図 19: 位置合わせ後の木星画像

3.2.3 木星経度輝度プロファイルの作成

分光撮像のデータからヘイズの外縁の経度である南緯 68° のピクセルを抽出し, 木星の経度輝度プロファイルを作成した. このとき, ヘイズの存在に由来する変化量に比べて木星外縁部の周辺減光が非常に大きいため周辺減光プロファイルを使用して補正を行った. 周辺減光プロファイルは観測期間中の木星画像を観測時の等級, 視直径を補正した上で全て加算平均を施した画像から同様に南緯 67° のピクセルを抽出して作成した. 図 (20) に 2020/07/30 における 1 枚画像から取得した周辺減光補正前の経度輝度プロファイル, 図 (21) に周辺減光プロファイルを示す.

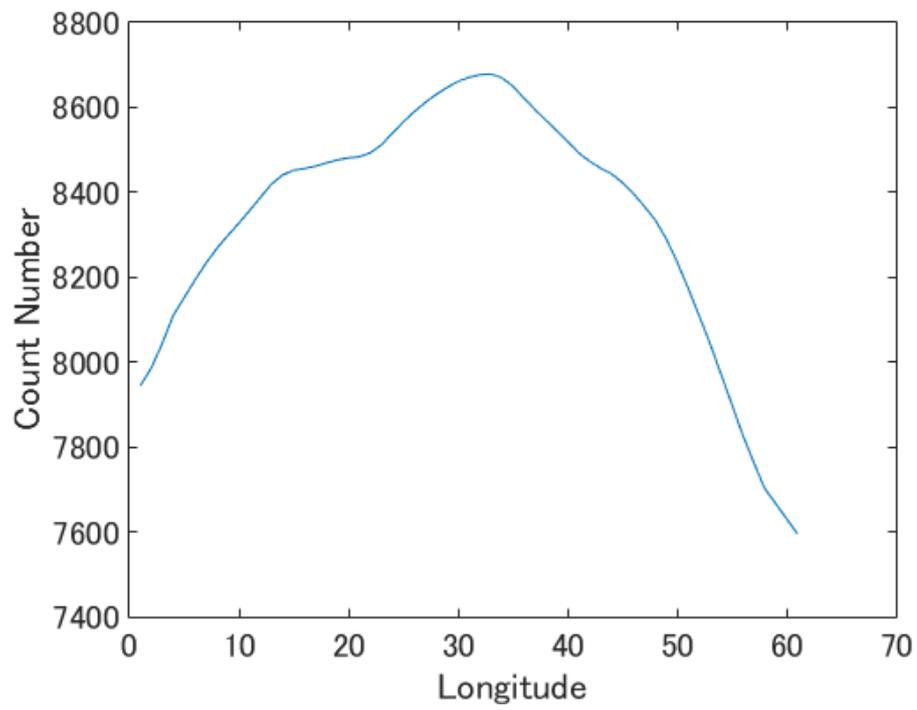


図 20: 経度輝度プロファイル (2020/07/30 727 nm)

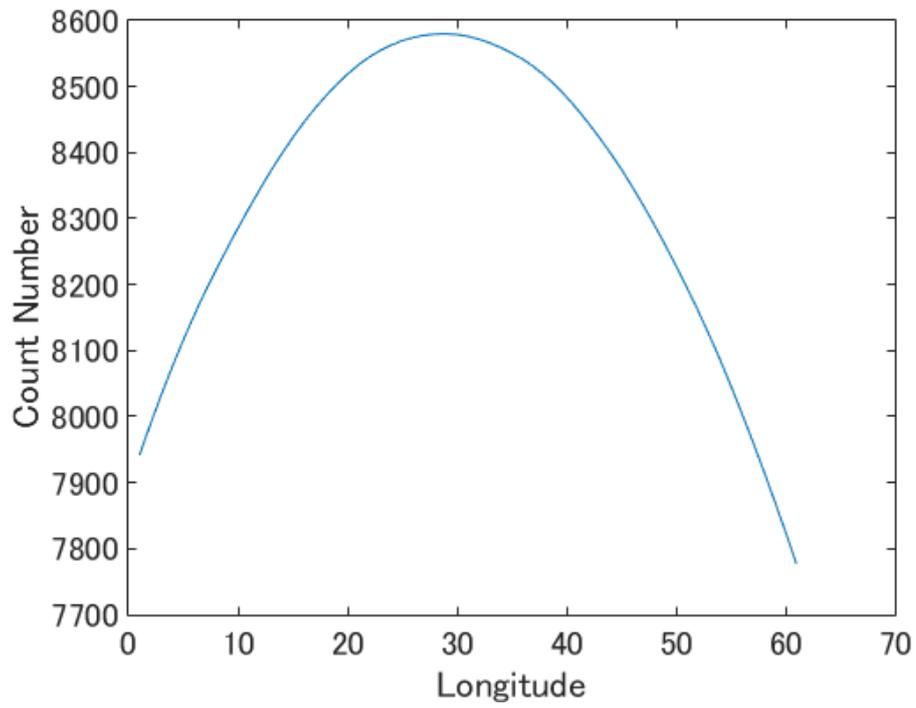


図 21: 周辺減光プロファイル

周辺減光を補正した輝度プロファイルは図 (22) のようになる. この輝度プロファイルを時間方向に平均して最終的な輝度プロファイルを作成した.

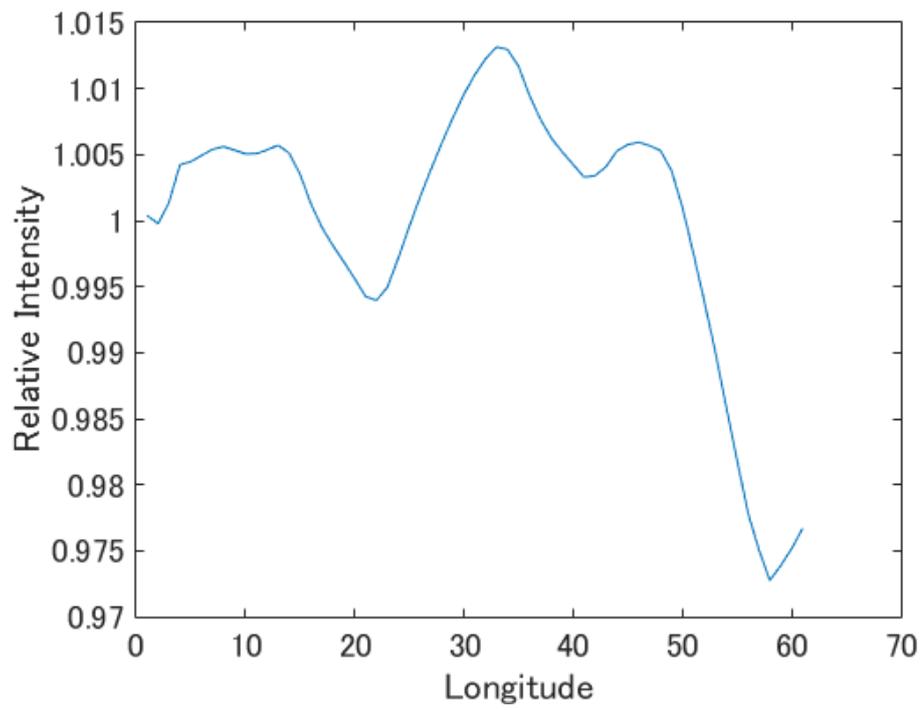


図 22: 周辺減光補正後の経度輝度プロファイル (2020/07/30 727 nm)

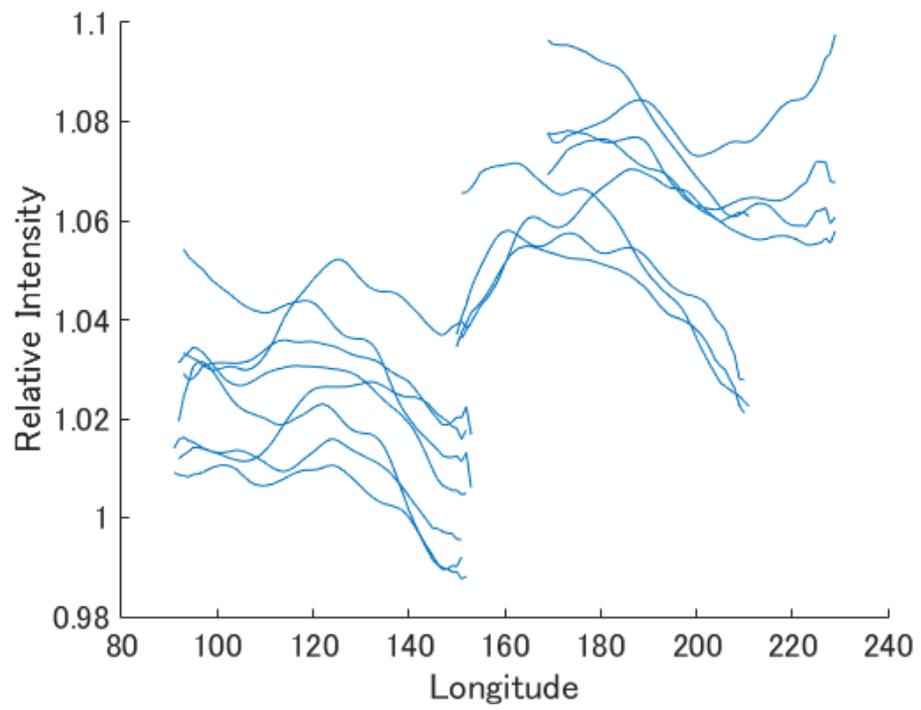


図 23: 時間毎に並べた経度輝度プロファイル (2020/07/30 727 nm)

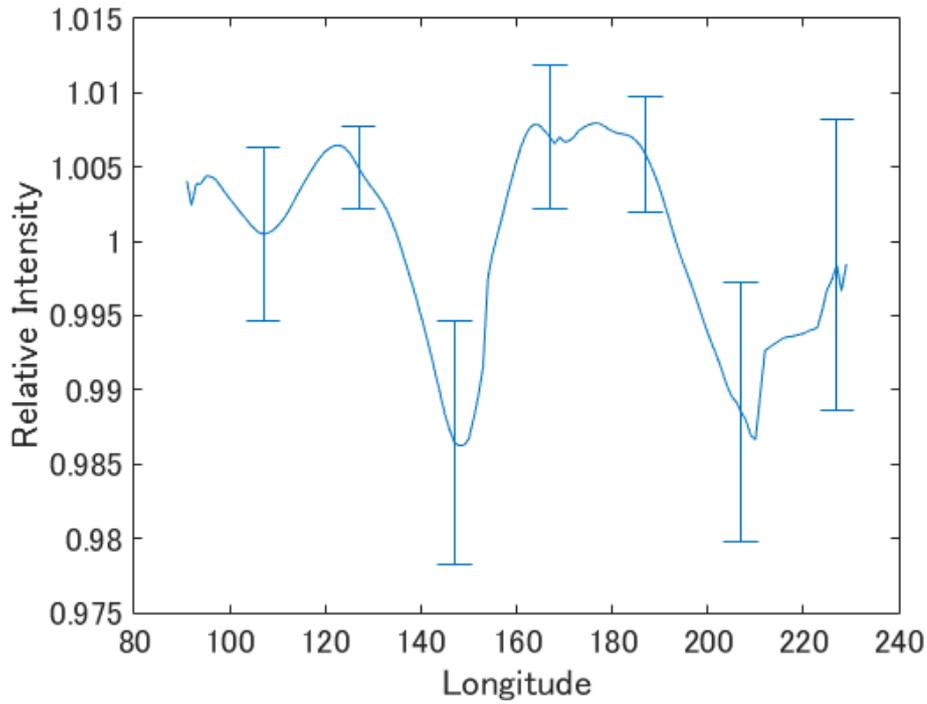


図 24: 経度輝度プロファイルの時間平均 (2020/07/30 727 nm)

3.2.4 装置偏光パラメータ取得

LCTF とは別の直線偏光子を光路上に挿入してドームフラットを偏光観測することにより器械消偏光の値を求めた. 偏光観測のデータでは $I(x)$ を半波長板の回転角 x° での異カウントの値とすると, 以下の計算式 (??),(??),(3),(4) から規格化されたストークスパラメータ $Q/I, U/I$ を計算できる. 以下, $q = Q/I, u = U/I$ とする.

$$\frac{Q}{I} = \frac{I(0) - I(45)}{I(0) + I(45)} \quad (3)$$

$$\frac{U}{I} = \frac{I(23) - I(68)}{I(23) + I(68)} \quad (4)$$

器械消偏光の偏光効率 p_{eff} は式 (??),(??) の $\frac{Q}{I}, \frac{U}{I}$ から計算される直線偏光度 $P = \sqrt{q^2 + u^2}$ に等しい. 図 (25) に LCTF(SNIR ユニット) の器械消偏光値のプロットを, 表 (7) に木星観測に使用した波長の器械消偏光の値を示す.

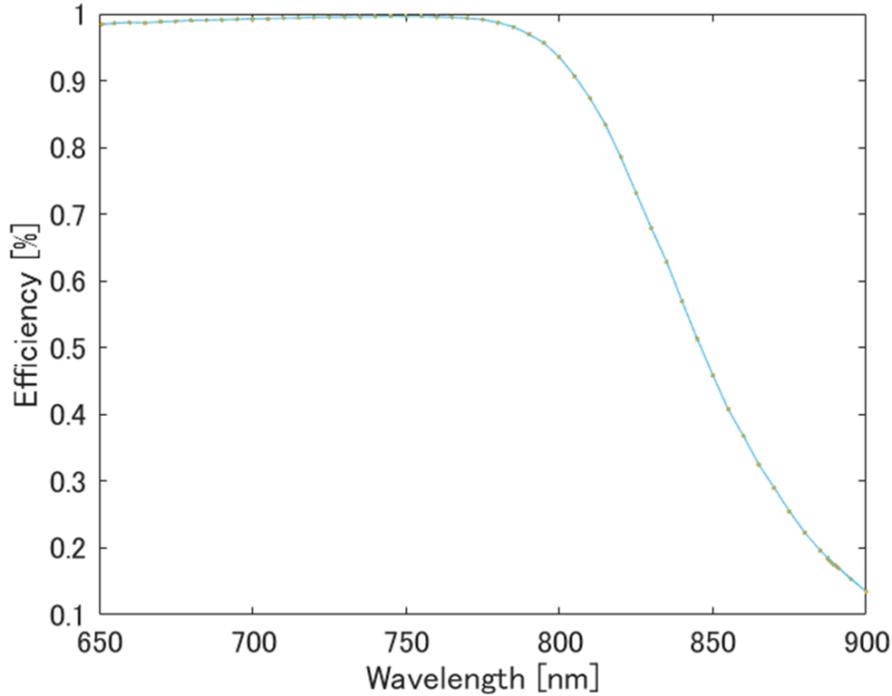


図 25: 装置系の偏光効率測定結果 (SNIR ユニット)

表 7: 装置系偏光効率

観測波長 [nm]	p_{eff} [%]
619	99.77
727	99.51
756	99.63
889	17.63

測定結果から 800 nm 以降で偏光効率が急減してしまうことが判明した. このため, 本研究の偏光観測結果では 889 nm の値は参考程度にとどめる.

偏光度が既知の無偏光標準星・強偏光標準星の観測データから LCTF 使用時の MSI の装置偏光パラメータを取得した. 無偏光標準星の画像から計算されたストークスパラメータ q, u はカセグレンローテーターの角度 φ の値に応じてサインカーブの形を成す. 装置偏光のストークスパラメータを $q_{instrument}, u_{instrument}$ として無偏光標準星を偏光観測した場合に観測されるストークスパラメータ q_0, u_0 は以下の式 (5), (6) で表される. このストークスパラメータは装置の器械消偏光の影響を受けている. これを補正するために q_0, u_0 装置の偏光効率 p_{eff} で割る.

$$q_0 = q_{instrument} \cdot \cos(2\varphi) - u_{instrument} \cdot \sin(2\varphi) \quad (5)$$

$$u_0 = u_{instrument} \cdot \sin(2\varphi) + u_{instrument} \cdot \sin(2\varphi) \quad (6)$$

$$q'_0 = \frac{q_0}{p_{eff}} \quad (7)$$

$$u'_0 = \frac{u_0}{p_{eff}} \quad (8)$$

無偏光標準星の観測はカセグレンローテータをおおよそ 10° ステップで 180° 回転させてデータを取得しているため観測データに式 (5),(6) の式をフィッティングを行い $q_{instrument}, u_{instrument}$ を導出した。図 26-?? に無偏光標準星の観測データとフィッティングの結果を示す。

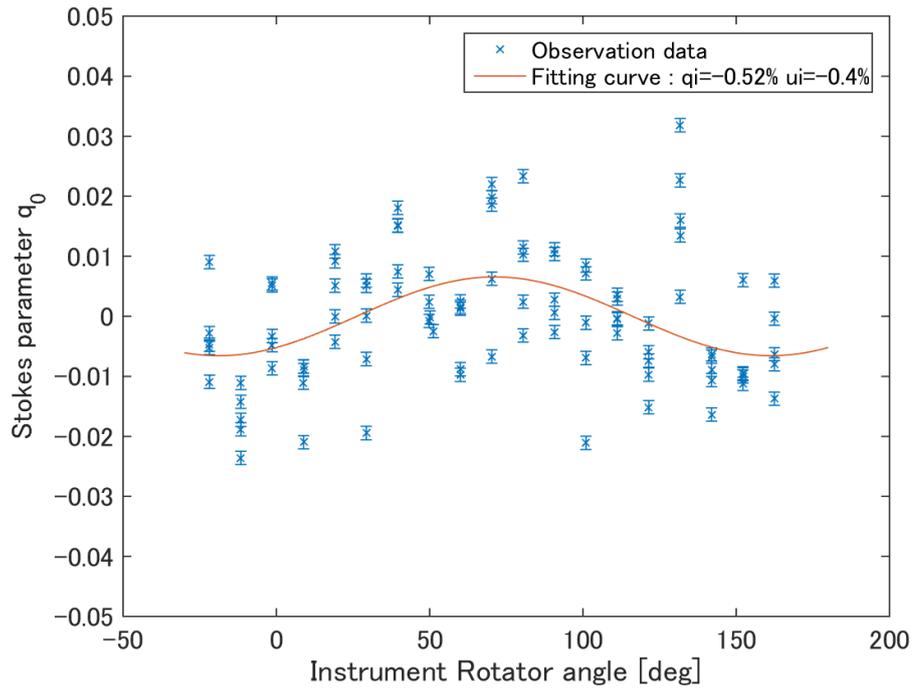


図 26: 無偏光標準星 Beta Cas による装置偏光パラメータのフィッティング結果 (619 nm)

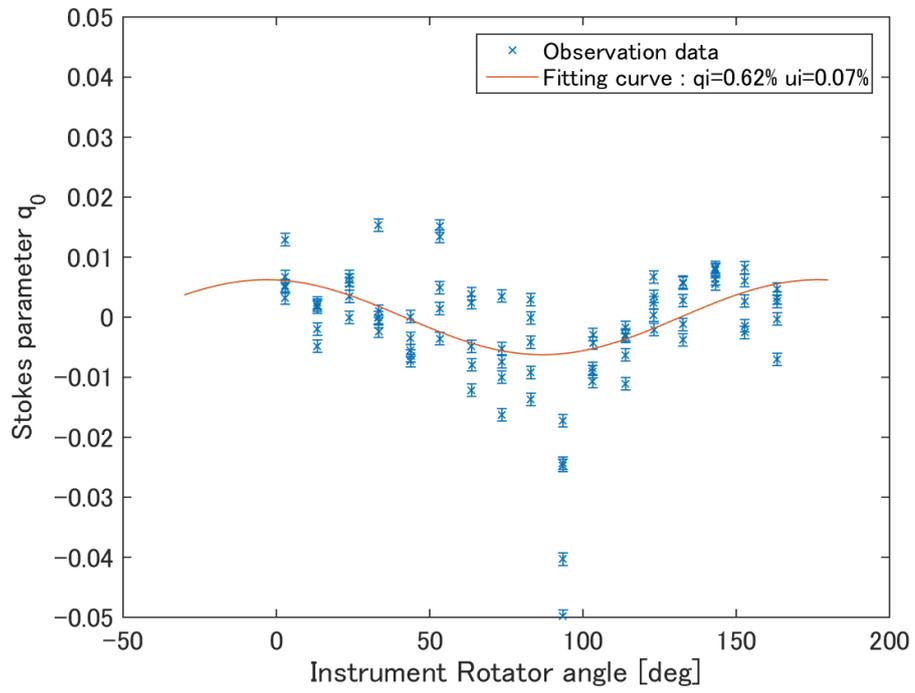


図 27: 無偏光標準星 Beta Cas による装置偏光パラメータのフィッティング結果 (727 nm)

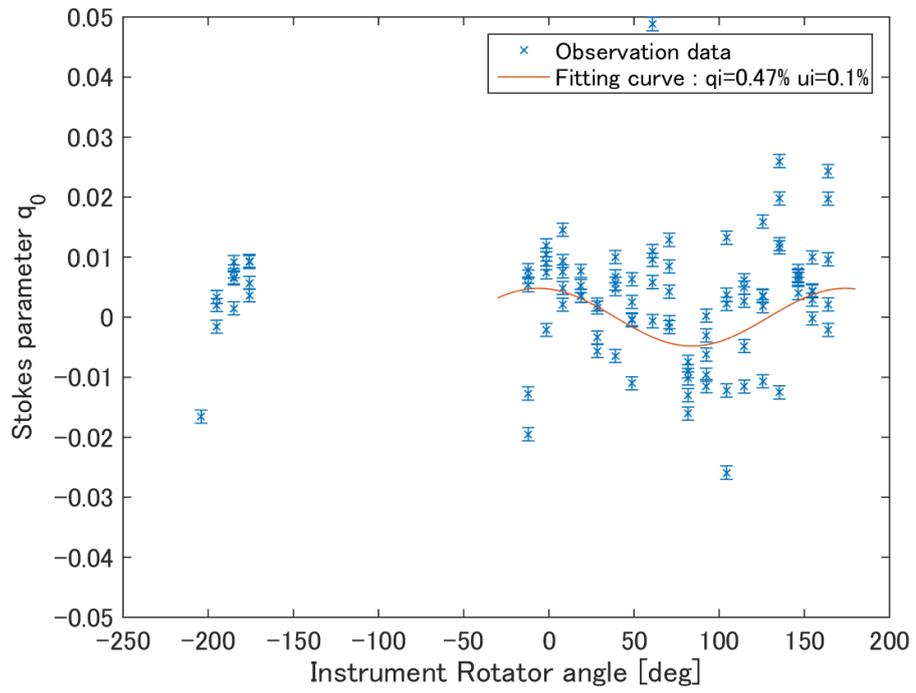


図 28: 無偏光標準星 Beta Cas による装置偏光パラメータのフィッティング結果 (756 nm)

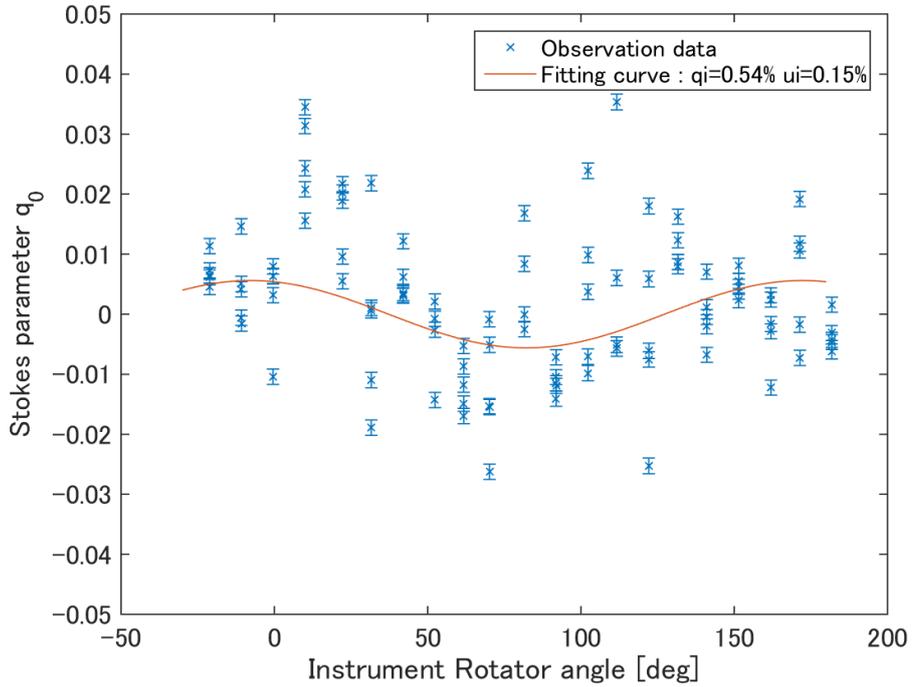


図 29: 無偏光標準星 Beta Cas による装置偏光パラメータのフィッティング結果 889 nm)

表 8: 装置偏光パラメータ

観測波長	Q [%]	U [%]
619	-0.52	-0.40
727	0.62	0.07
756	0.47	0.10
889	0.54	0.15

導出された $q_{instrument}, u_{instrument}$ の値は装置系の偏光方向を基準とした値である。これを天体系、すなわち天の北を基準とした偏光方向に補正するために偏光方向が既知の強偏光標準星の偏光観測データからストークスパラメータ q_{st}, u_{st} を計算した。このストークスパラメータも器械消偏光の影響を除くために偏光効率 p_{eff} で割る。

$$q'_{str} = \frac{q_0}{p_{eff}} \quad (9)$$

$$u'_{str} = \frac{u_0}{p_{eff}} \quad (10)$$

器械消偏光を補正した q'_{st}, u'_{st} は前述の装置偏光 $q_{instrument}, u_{instrument}$ の値が乗っているためこの装置偏光を以下の式 (11), (12) に従って補正を行う。

$$q''_{st} = q'_{st} - \{q_{instrument} \cdot \cos(2\varphi) - u_{instrument} \cdot \sin(2\varphi)\} \quad (11)$$

$$u''_{st} = q'_{st} - \{u_{instrument} \cdot \sin(2\varphi) + u_{instrument} \cdot \sin(2\varphi)\} \quad (12)$$

直線偏光の偏光方向 θ は以下の式 (13) で表される。

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{u''_{st}}{q''_{st}}\right) \quad (13)$$

この偏光方向 θ と強偏光標準星の偏光方向 θ_{star} には以下の式 (14) または式 (15) の関係がある。 θ_{offset} は装置偏光の偏光方向のオフセットである。

$$\theta_{star} = \theta + \theta_{offset} \quad (14)$$

$$\theta_{star} = -\theta + \theta_{offset} \quad (15)$$

式中の θ の符号を決定するために異なる 2 つの強偏光標準星のデータを用いた。表 (9) に得られた装置の偏光方向オフセットを示す。

表 9: 装置の偏光方向オフセット

観測波長	θ_{off} [°]
619	44.60
727	149.29
756	146.26
889	148.65

3.2.5 木星経度偏光度プロファイルの作成

偏光観測の画像解析では画像の各ピクセルに対して、ストークスパラメータを計算した。計算方法と装置偏光の補正は式 (5)-式 (12) と同様である。その後 θ_{off} の値を用いて装置座標系のストークスパラメータを式 (16)-式 (18) に従って、天球座標系への変換する。 φ はカセグレンローテータの位置角である。

$$\theta = \theta_{offset} - \varphi \quad (16)$$

$$q''' = q'' \cdot \cos(2\theta) + u'' \cdot \sin(2\theta) \quad (17)$$

$$u''' = u'' \cdot \cos(2\theta) + u'' \cdot \sin(2\theta) \quad (18)$$

座標変換後のストークスパラメータ q''', u''' から偏光度 P を計算した。

$$P = \sqrt{q'''^2 + u'''^2} \quad (19)$$

4 Results

本章では1節で木星分光撮像観測によるヘイズ波構造について,2節で木星偏光撮像観測による結果を示す.

4.1 木星分光撮像観測

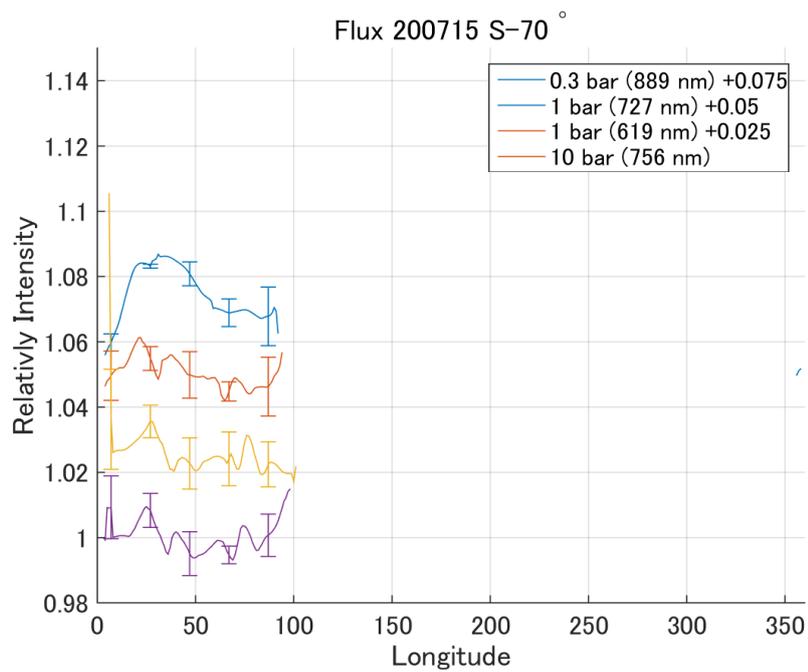


図 30: 2020/07/15 輝度プロファイル

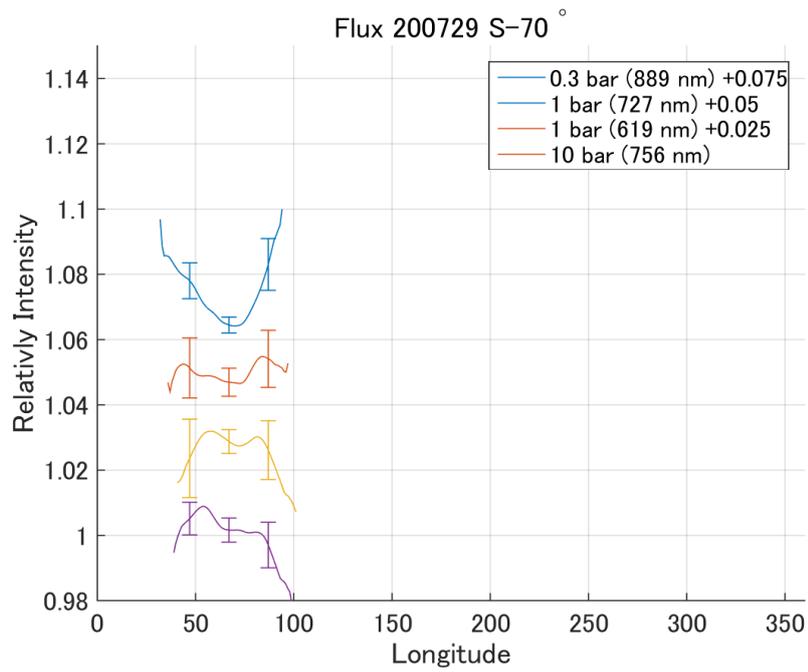


図 31: 2020/07/29 輝度プロファイル

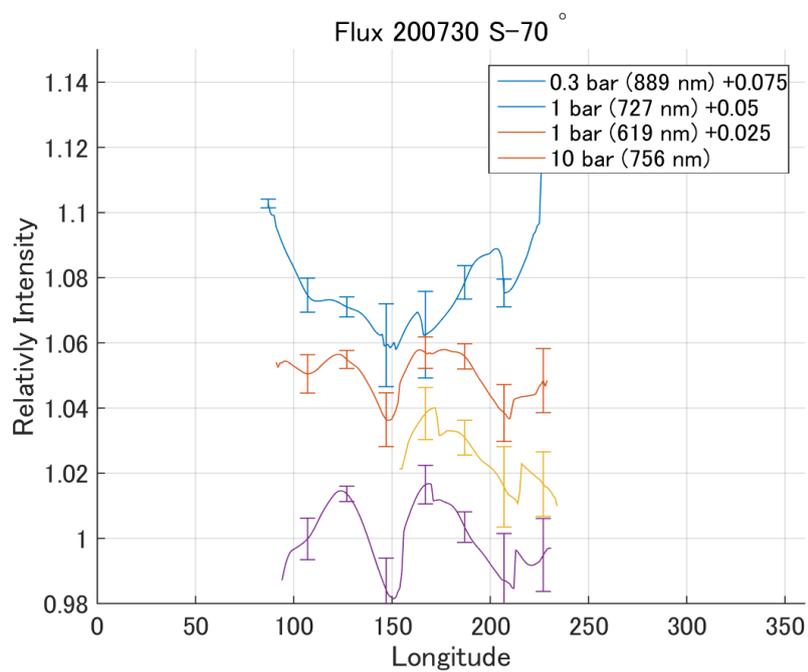


図 32: 2020/07/30 輝度プロファイル

7/30 の輝度プロファイルは時間が大きく異なるデータを平均している. そのため図 (33) に見られるように経度 150° 付近と 210° 付近の変動は実際の変動でない可能性に留意する必要がある.

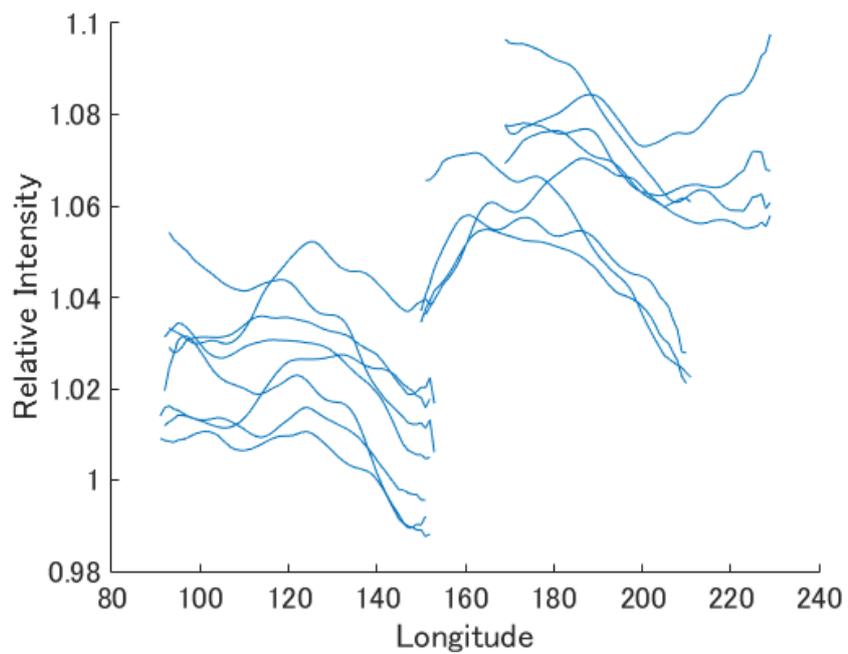


図 33: 2020/07/30 輝度プロファイル

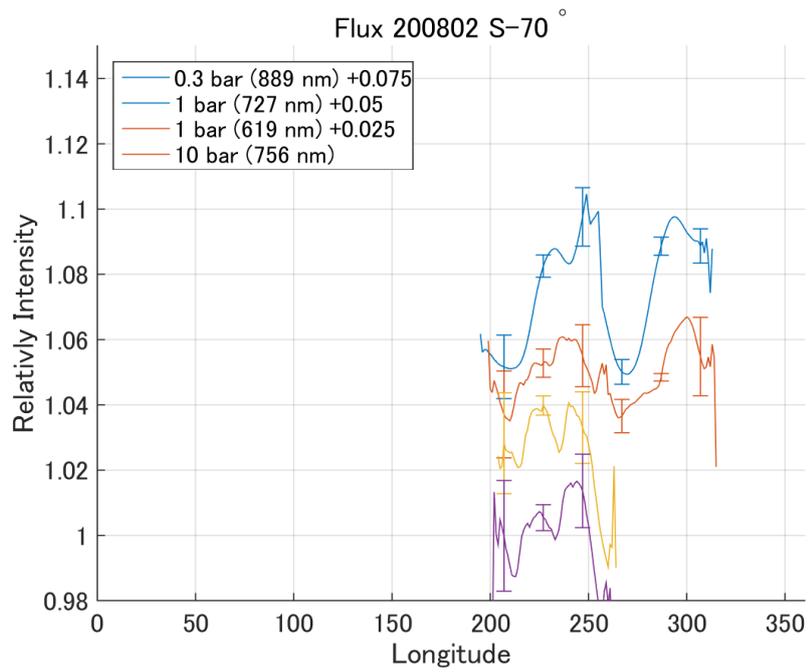


図 34: 2020/08/09 輝度プロファイル

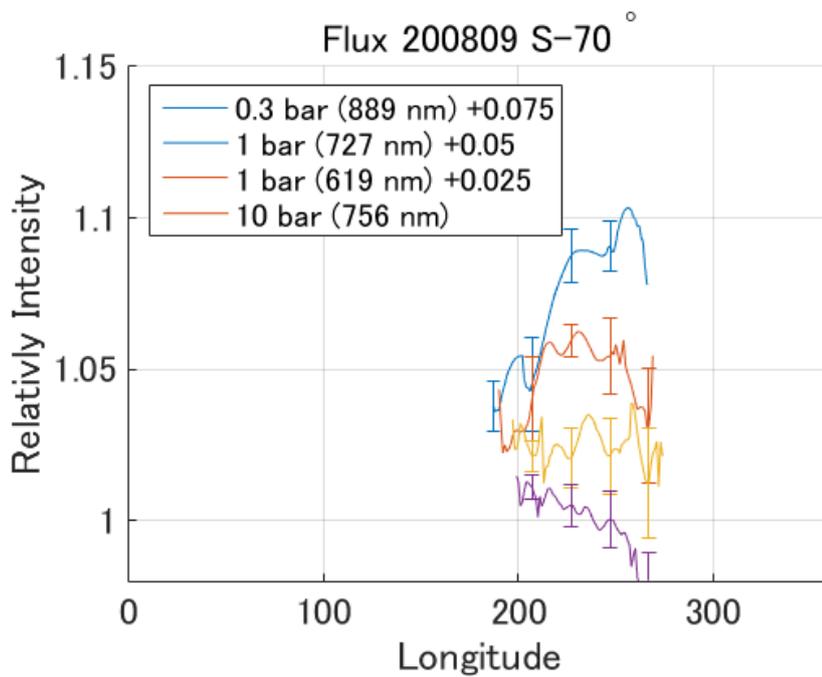


図 35: 2020/08/09 輝度プロファイル

4.2 木星偏光撮像観測

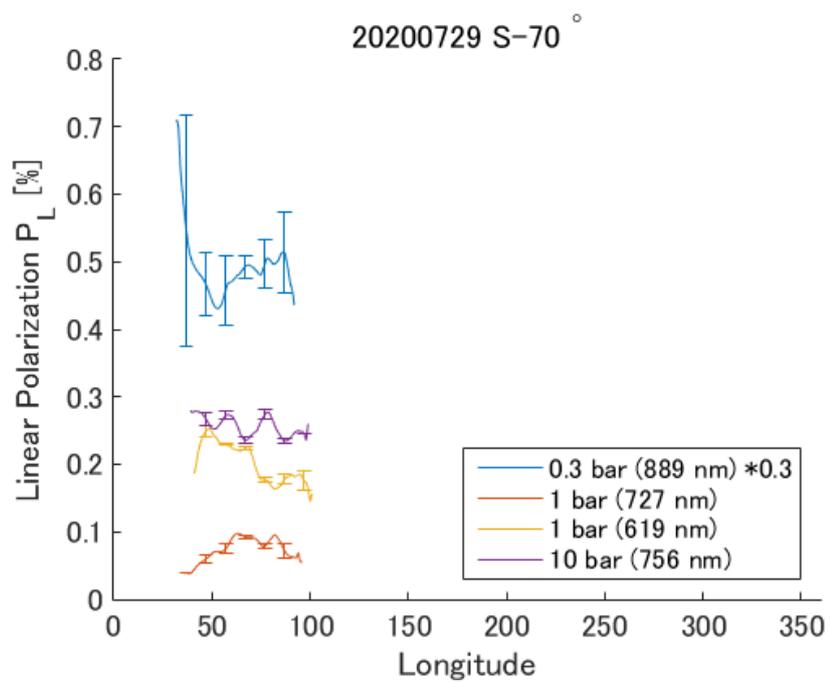


図 36: 2020/07/29 偏光度プロファイル

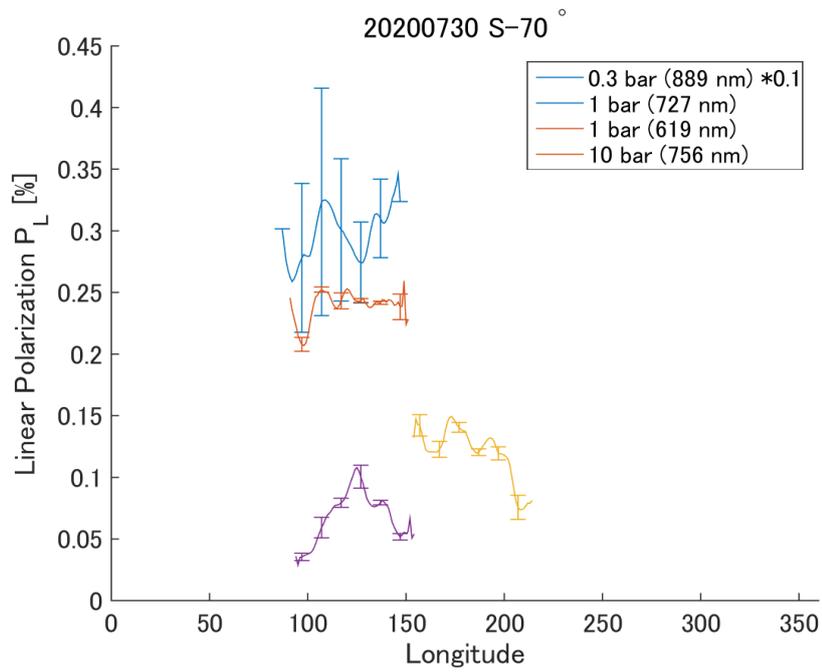


図 37: 2020/07/30 偏光度プロファイル

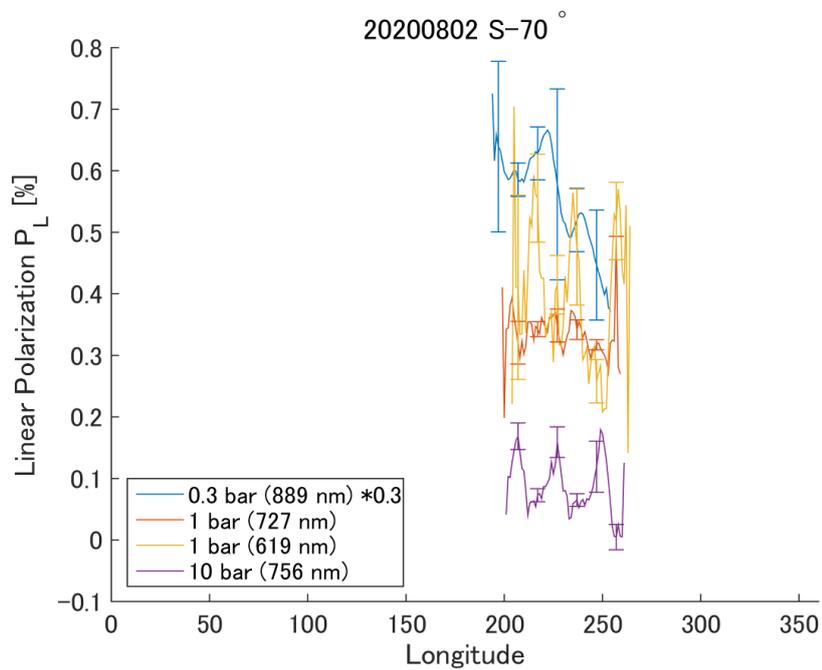


図 38: 2020/08/02 偏光度プロファイル

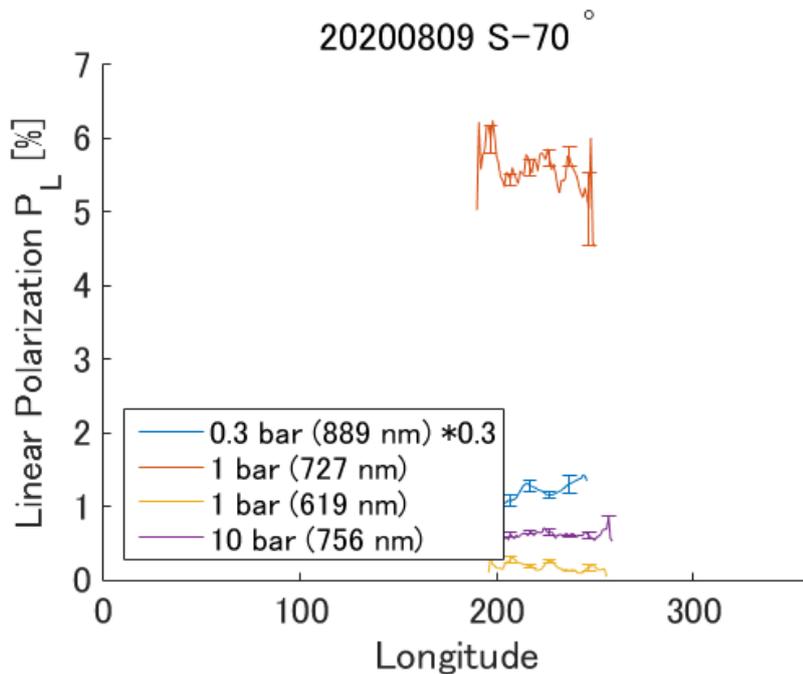


図 39: 2020/08/09 偏光度プロファイル

5 Discussion

5.1 木星分光撮像観測によるヘイズ波構造

分光撮像観測の結果のうち 20° 程度の周期をもつ変動はヘイズの波構造の一部を示していると考えられる。観測時のシーイングサイズは 2-3 秒程度であり、これは南緯 67° の中心経度付近で $10 - 15^\circ$ 程度に相当する。このため観測された波形のうち 10° 未満の周期の経度方向の変動は地球大気の影響を考慮すると信頼できる構造ではないと考えられる。変動の振幅はどの観測日でも 0.98-1.02 の範囲に収まっており 2014-2015 年の観測結果と矛盾しない。7/30 の波形からは 150° 付近の負のピークが突出しているが、この経度付近では時間の異なるデータの切れ目にあたるため実際の変動幅よりも大きく減光しているように見えると考えられる。 230° 前後に見られる谷間は 8/02 にも存在しているように見える。8/02 の経度 220° , 240° の明るいピークは 8/09 でも同様に確認ができる。

異なる高度に感度を持つ波長毎の比較では 7/15, 7/30, 8/02, 8/09 の結果において 889 nm と 727 nm に共通した波構造が認められる。これらの構造と 619 nm の構造は 8/02 の 240° 付近に見られるような共通したピークも認められるものの 889 nm と 727 nm ほど似ているわけではない。このためより深い層の波形になるほど共通性が失われる傾向があることから木星大気上層における対流構造は 1 bar より上層でのみ影響を及ぼしていることが示唆される。

5.2 分光撮像観測と偏光撮像観測の比較

これまでの木星偏光度分布の先行研究では緯度方向の変動と極域の高緯度が議論されてきた一方で、経度方向の偏光度変化にはあまり注目されていなかった。7/29, 7/30, 8/2の結果から経度方向にも1%未満の変動が確認できる。7/30における100°付近と120°付近の輝度プロファイルと偏光度プロファイルは共通した変化が見られるように輝度プロファイルと偏光度プロファイルの経度分布は比較的共通した傾向がみられる。McLeanらのR, V, Bバンドを使用した偏光撮像観測では観測波長が長いほど緯度方向の変動、すなわち帯構造に対応した雲頂高度の違いを反映する偏光度の変動幅が小さくなっている。経度方向にもフラックス強度の違いが表しているヘイズや雲の高度に偏光度が影響を受けているように見える。より高い領域で散乱された光がメタンの吸収の影響をより受けにくくなると考えるとこの傾向の説明がつく。そのため偏光度を用いて周辺領域と比較した粒子特性の変化の有無を議論する際にはフラックスの強度を考慮に入れる必要がある。波長毎の偏光度の比較では参考程度にとどめる必要がある889 nmを含めて、より強いメタン吸収のある波長ほど偏光度が高く検出される傾向がある。これは2003年のSchmidらのスリット分光観測の結果と矛盾しない。一方で730 nm, 890 nmの観測波長を使用したSchmidら, B, V, Rバンドを用いたMcLeanらの観測結果では赤道から20°離れた緯度68°付近の領域では直線偏光度の値は5%を記録している一方で本研究の889 nmを除く727 nm, 619 nm, 756 nmで0.2%程度の値にとどまっている。

8/9の727 nmの偏光度が他の観測日のデータと比べて突出している。この結果は常光線と異常光線を同時に取得することができないLCTFによる偏光観測において天候の安定性が極めて重要であり半波長板の回転時に明るさを変化させる原因である薄雲の通過があったと考えられる。直線偏光子を使用した偏光観測に求められる天候条件の厳しさが現れた結果となった。

6 Summary

本研究では分光撮像観測と同時に行う撮像偏光観測により極域ヘイズの時間変化と偏光度分布の時間変化を比較し、特定高度に注目した偏光度の時間変化を明らかにすることで輝度的に安定している領域の粒子特性の変化の有無を明らかにすることを試みた。2020年7月から10月までの期間においてピリカ望遠鏡を使用した木星分光撮像観測と偏光撮像観測を行い、21夜の観測で数日間の連続したデータと1週間以上間の空いたデータを取得した。典型的なシーイングサイズは2-3秒角であった。

分光撮像観測の結果からは7/15, 7/29-7/30, 8/2において南極域に存在するヘイズの波構造が数日程度維持されていることが確認された。889 nmで観測される最も上層のヘイズ構造は727 nm, 619 nmにおいても共通した波形が見られることもある。より深い層の波形になるほど共通性が失われる傾向があることから木星大気上層における対流構造は1 barより上層でのみ影響を及ぼしていることが示唆された。測定された装置光学系の器械消偏光の値は800 nm以上の波長で著しい現象を起こしており、889 nmの偏光撮像観測結果は信頼性に乏しく参考程度にとどめる必要があるが輝度プロファイルと偏光度プロファイルの比較ではフラックスの強度と偏光度の大きさに共通した変化が見られた。このため偏光度を用いて周辺領域と比較した粒子特性の変化の有無を議論する際には

フラックスの強度を考慮に入れる必要がある. 高緯度域の偏光度の値は先行研究の値と比べて低く出ており経度方向の変動も 0.1%程度にとどまっていた.

7 Acknowledgements

この論文を作成するに当たり, 多くの方々にお世話になりました.

指導教官の佐藤 光輝 教授には研究を進めていくにあたって, 研究のアイデアや, 着目点, 解析など, 丁寧なご指導をいただきました.

高橋 幸弘 教授には研究に対する姿勢, 考え方など多くのことを教えていただきました.

高木 聖子 特任助教をはじめ, ピリカ望遠鏡ユーザーの皆様には, 限られた観測時間の中で望遠鏡を使用するにあたって様々な点で協力していただきました.

そして, なよろ市立天文台の職員の皆様および, 惑星宇宙グループの先輩, 同期, スタッフの皆様には研究室生活の中で大変お世話になりました. この場を借りてお礼申し上げます.

8 References

参考文献

- [1] Banfield, D., Gierasch, P. J., Bell, M.; Ustinov, E., Ingersoll, A. P., Vasavada, A. R., West, Robert A., Belton, M. J. S., (1998) Jupiter's Cloud Structure from Galileo Imaging Data, *Icarus* 135 230-250
- [2] Barrado-Izagirre. N., Jrojas. J., Hueso. R., Sanchez-Lavega. A., Colas. F., Dauvergne. J., Peach. D., and the IOPW Team., (2013). - Jupiter's zonal winds and their variability studied with small-size telescopes., *Astron Astrophys*, Volume 554, id.A74, 11 pp (2013)
- [3] Karkoschka. E., (1994), Spectrophotometry of the Jovian Planets and Titan at 300- to 1000-nm Wavelength: The Methane Spectrum, *Icarus* 111 174-192
- [4] McLean, W., Stam, D. M., Bagnulo, S., Borisov, G., Devogèle, M., Cellino, A., Rivet, J. P., Bendjova, P.(2017), Vernet, D., Paolini, G., Pollacco. D., A polarimetric investigation of Jupiter: Disk-resolved imaging polarimetry and spectropolarimetry, *Astron. Astrophys.*, 601, A142
- [5] Stam. D. M., Hovenier. J. W., and Waters. L. B. F. M., (2004), Using polarimetry to detect and characterize Jupiter-like extrasolar planets, *Astron. Astrophys.*, 663-672, A428
- [6] Schmid. H. M., Joos. F., Buenzli. E., and Gisler. D., (2011), Long slit spectropolarimetry of Jupiter and Saturn, *Icarus* 212 701-713 (2011)

- [7] Seiff, A.; Kirk, D.B.; Knight, T.C.D. et al. (1998). Thermal structure of Jupiter's atmosphere near the edge of a 5- μ m hot spot in the north equatorial belt. *Journal of Geophysical Research* 103 22857-22889
- [8] Smith, P. H., Tomasko, M. G., (1984), Photometry and polarimetry of Jupiter at large phase angles II. Polarimetry of the South Tropical Zone, South Equatorial Belt, and the polar regions from the Pioneer 10 and 11 missions, *Icarus* 58 35-73.
- [9] Tabataba-Vakili. F., Rogers. J. H., Eichstädt. G., Orton. G. S., Hansen. C. J., Momary. T. W., Sinclair. J. A., Giles. R. S. , Caplinger. M. A., Ravine. M. A., Bolton. S. J., (2020), Long-term tracking of circumpolar cyclones on Jupiter from polar observations with JunoCam, *Icarus* 335 113405
- [10] Wolstencroft. R. D., Smith. R. J., (1979), Spectropolarimetry of the Metha and Ammonia of Jupiter between 6800 and 8200 \AA , *Icarus* 38, 155-165
- [11] Xylar S.Asay-Davisa., Philip. S. Marcus., Michael H.Wong., Imkede Pater., (2011), Changes in Jupiter ' s zonal velocity between 1979 and 2008, *Icarus* 211 1215-1332
- [12] 今井正亮 (2013) ピリカ望遠鏡による金星紫外吸収模様の緯度プロファイルと循環周期観測
- [13] 合田雄哉 (2016) 木星極域ヘイズの外縁部波構造及び非対称分布
- [14] FN の高校物理 「偏光とは何か」
http://fnorio.com/0124polarization_of_light0/polarization_of_light0.html
 2019/01/31 07:28 閲覧
- [15] 国立天文台編, 理科年表 平成 24 年 丸善出版
- [16] 松田佳久,(2000), 「惑星気象学」, 東京大学出版会
- [17] Calibrations required for FOCAS polarimetry
<https://www.naoj.org/Observing/Instruments/FOCAS/pol/calibration.html>
 2021/01/17 14:56 閲覧