

修士論文

木星極域ヘイズの外縁部波構造及び非対称分布

平成 28 年 2 月 1 日

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 20143081

合田雄哉

要旨

木星大気にはエアロゾル粒子からなるヘイズが存在することが知られている。100 mbar 以上の成層圏は極を覆うようにヘイズが広がっており、光学的に散乱するこれらの粒子を 889 nm のメタン吸収波長で観測することによって、この領域は明るく見える。ボイジャーの観測によって、南半球ではヘイズの外縁部は、南緯 67 度付近で経度方向に広がる波状の構造をしていることが発見された [A. Sanchez-Lavega et al, 1998]。またカッシーニとハッブル宇宙望遠鏡によって、1994 年から 2000 年にかけて 1, 2 年ごとに 1 回の割合で木星が観測された。波構造の 0- 10 m/s の経度方向の移動速度及び経度方向の波数は 12- 14 だということが明らかになった。観測結果から、成層圏極域でみられる波構造が惑星ロスビー波だということが示唆された [N. Barrado-Izaguirre et al, 2003]。しかし、これらの観測は観測期間に 1, 2 年以上の大幅な時間の開きが存在する。数年間存在し続ける波構造だけではなく、数日で消滅する雲対流などより規模の小さい構造を発見するのには不十分である。ロスビー波や雲対流を含む大気構造を特定するためには、どの程度の期間にわたって構造が維持されるのか明らかにする必要がある。

本研究は木星モニタリング観測を行い、これまで指摘されていない、数日で消滅する大気構造の存在の有無を明らかにすることを目的とした。またメタン吸収が異なる波長を用いて、波構造の鉛直分布及び 889 nm での緯度分布を調べ、空間分布を制約することも目的とした。

今回地上望遠鏡を用いて 889 nm を主とするメタンバンド波長で観測を行った。計 7 期間 (2011 年 10 月 19 日, 10 月 29 日, 11 月 16 日, 2014 年 3 月 27 日, 2015 年 4 月 8 日, 4 月 9 日, 4 月 13 日) で波構造を得ることができた。図 1 左は 889 nm での木星画像で、南緯 67 度を示す赤線に沿った明るさの経度プロファイルを作成した (図 1 中央)。各日 5- 15 分おきに撮像された観測データから、1 つの経度プロファイルを作成した (図 1 右)。観測結果から、波構造とロスビー波の性質の比較および局地的・短期的な雲対流等の構造の存在について議論を行った。

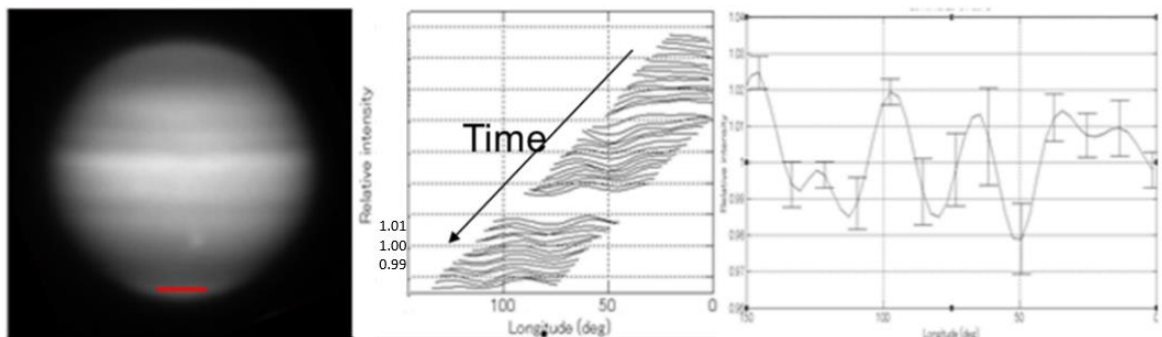


図 1 木星画像 (左) と明るさの経度プロファイル (中央), 合成したプロファイル (右)

図 2 の 7 期間の経度プロファイルの時間変化から、2011 年 10 月の 2 期間及び 2015 年 4 月の 3 期間において、同じ経度で波の正負のピークが 3 つ以上連続して並んでいる箇所 (図 2 青

線で囲った箇所) が明らかになった. 一方 2011 年の 10 月 29 日と 11 月 16 日の波構造のプロファイルでは, 経度 100 度付近 (図 2 の赤線で囲った箇所) のように, 2 週間余りで経度プロファイルのピークが消失した箇所も見つかった. 波構造は短時間で局所的に変化することが明らかになった.

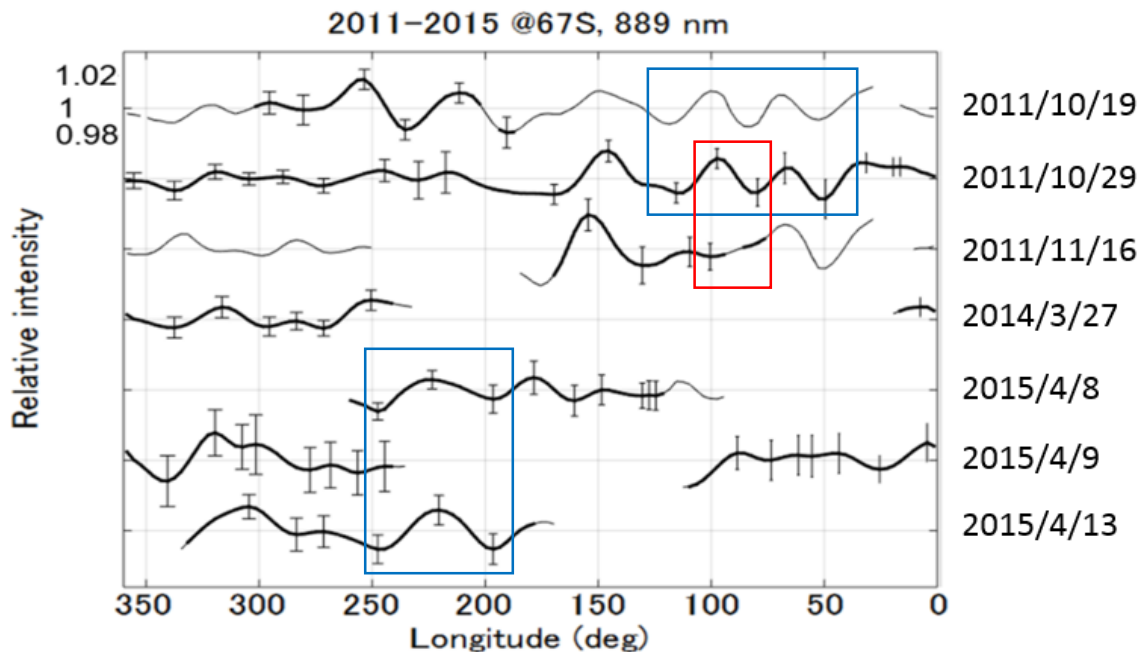


図 2 木星極域 (南緯 67 度) での明るさの経度プロファイルの時間変化

また波構造の空間分布を明らかにするために, 観測高度が異なる複数波長を用いた木星観測も行った. 木星大気にはメタンが含まれており, 観測波長ごとのメタンの吸収の違いによって観測高度が異なる. 本研究で用いた観測波長及び対応する観測高度は, 889 nm (ヘイズ高度), 727 nm, 619 nm (対流圏上部), 750 nm (対流圏深層) である. 波構造の鉛直方向の変化は, 経度によって異なることが明らかになった. 特に 2015 年 4 月 9 日はこれが顕著で, 経度 250 度から 360 度にかけて, 889 nm, 727 nm と 619 nm, 750 nm の波構造は大きく異なっている. 一方, 経度 0 度から 100 度では 889 nm ではエラーが大きいものの, 4 波長全てにおいて波構造が類似している. このような経度による, 異なる観測波長間の波構造の類似性の違いが発見された. また波構造の緯度変化から, 南緯 67 度の波構造の低緯度側の境界は, 南緯 56 度から 47 度の間に存在すると見積もられた.

さらに極域ヘイズの緯度経度方向の空間分布を明らかにした. 北半球ではヘイズの分布は極に対して非対称で, 南半球ではこのような非対称性は見られず, 極に対しほぼ同心円状に広がって分布していた. またハッブル宇宙望遠鏡の近赤外波長での観測で, オーロラオーバルの空間分布も極に対して同心円状ではなく, 楕円状に広がっていることが判明している. オーロラオーバルと極域ヘイズの空間分布を比較して, 北半球ではオーロラオーバルとヘイズの分布の間には, 類似点がいくつか見つかった. ヘイズの空間分布がオーロラオーバルの空間分布を反映している可能性がある.

目次

1. 序論	1
1.1 木星大気	1
1.2 極域ヘイズとその先行研究	3
1.3 ロスビー波	5
1.4 木星オーロラ	6
1.5 本研究の目的	7
2. 観測	9
2.1 北海道大学大学院理学院附属ピリカ望遠鏡	9
2.2 Multi-Spectral Imager	10
2.3 木星観測	11
3. 解析	13
3.1 木星画像の1次処理	13
3.2 連続画像の位置補正	14
3.3 画像の合成	15
3.3.1 合成する画像の選択方法	15
3.3.2 足し合わせの仕方	17
3.4 サブピクセル画像の作成	18
3.5 周辺減光の補正	20
3.6 木星経度プロファイルの作成	20
3.6.1 プロファイルの経度幅の決定	21
3.6.2 木星経度プロファイルの合成	22
4. 結果	23
4.1 波構造の時間変化	23
4.2 波構造の鉛直方向の変化	24
4.3 波構造の緯度方向の変化	27
4.4 極域ヘイズの空間分布	32

5. 議論	35
5.1 経度プロファイルの時間変化	35
5.2 波構造の鉛直・緯度変化	35
5.3 極域ヘイズの非対称性	36
6. 結論	39
6.1 経度プロファイルの時間変化	39
6.2 波構造の空間分布	39
6.3 オーロラオーバルと極域ヘイズの比較	40
謝辞	42
参考文献	43

1. 序論

まず木星および木星大気に関して、その特徴を 1.1 節で記述し、次に木星極域ヘイズの概要とその先行研究について 1.2 節で述べる。さらにロスビー波の判断に必要な分散関係を 1.3 節で、1.4 節で木星オーロラの概要と極域ヘイズとの関係性について、1.5 節で本研究の目的とその新規性について述べる。

1.1 木星大気

木星はガス惑星であり、地球をはじめとする岩石惑星とはその表層は大きく異なっている。木星は地球に対して 11 倍の半径と 318 倍の質量を持ち、大気組成は水素 (86.4 %) とヘリウム (13.6 %) を中心に、微小成分としてメタン (0.2 %) とアンモニア (0.007 %) で構成されている。また、木星はガス惑星であるため地表面を持たず、自転の基準が固体惑星である地球とは大きく異なる。そのため木星では大気の運動に則して、3 種類の自転系が定義されている。本研究ではすべて電波天文学により定義される、木星固体核に等しいとされる木星磁場圏の自転周期 (9 時間 55 分 29 秒) に合わせた System III 座標系を用いて議論を行う。以下にわれわれの住む地球と比較した木星のパラメータを示す (表 1.1)。

表 1.1 木星及び地球の諸情報

	木星	地球
赤道半径(km)	71,992	6,357
質量(g)	1.90×10^{30}	5.97×10^{27}
密度(g/cm ³)	1.33	5.52
自転周期	9時間55分29秒	23時間56分4秒
公転周期(年)	11.86	1.00
赤道傾斜角(度)	1.30	23.40
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%)
幾何学アルベド	0.520	0.376

木星大気の鉛直方向には、下部から上部に向けて温度勾配によって対流圏、成層圏、熱圏、外気圏に分けることができる。地球と異なり木星には中間圏は存在しない。木星はガス惑星であるため、大気の下限ははっきりしていないが、通常 1 bar 付近が下限として扱われる。木星対流圏は下から順に H₂O, NH₄SH, NH₃ の 3 種類の雲が存在する。また雲層より

上部の対流圏及び成層圏にわたってヘイズ層が存在する．木星対流圏と成層圏の境界である対流圏界面は高度 0.1 bar で、これより上の成層圏ではヒドラジン (N_2H_4) や多環芳香族炭化水素 (PAH) でできたもやの層があり、成層圏ヘイズとして扱われる．また、ここでは太陽の紫外線によってメタンが生成する．以下に木星大気の鉛直構造について載せる (図 1.1).

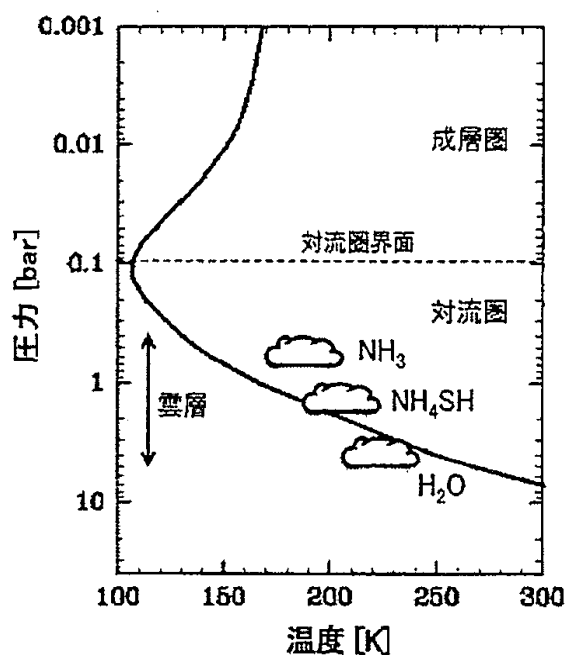


図 1.1 木星大気の鉛直構造 [杉山耕一朗 他 2011]. 縦軸が圧力高度、横軸が各高度での温度を示す.

木星大気の緯度方向は赤道に平行で経度方向に広がる数十の帯によって分けられており、それぞれ周りに対して明るい緯度帯はゾーン、暗い緯度帯はベルトと呼ばれている．木星の赤道域から高緯度にかけてゾーンとベルトが交互に並んでおり、このゾーンとベルトの構造が 50 度付近まで広がっている．また木星の風速は緯度ごとによって異なり、風速のプロファイルも時間変化しない．図 1.2 は木星北緯 60 度から南緯 60 度までの風速のプロファイルを示す．図 1.2 の実線が各緯度での経度方向の風速を表わす．

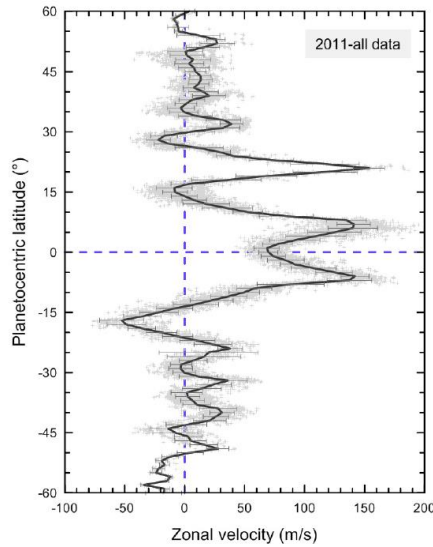


図 1.2 木星風速の緯度プロファイル [N. Barrado-Izagirre et al 2013]. 横軸は帯状風速度, 縦軸は緯度を示す. また各緯度で風速のエラーバーがついている.

1.2 極域ヘイズとその先行研究

木星の両極域には成層圏ヘイズが存在しており, 889 nm のメタン吸収波長で木星を観測したとき, ヘイズの散乱光によって極域が明るいキャップ状の構造が見える. この極域の観測は, 1994 年から 1999 年のハッブル宇宙望遠鏡と 2000 年の土星探査機カッシーニによる木星へのフライバイ観測によって行われた. これらの観測により, このキャップ状の構造の外縁部は南北両半球で波構造になっていて, 南半球ではおよそ南緯 67 度を中心として波構造になっていることが判明した(図 1.3). またこれらの観測結果から, 図 1.4 のように波のピークの時間変化を追うことで, 極域ヘイズの経度方向の波動の移動速度の計測を行った. またその緯度での背景風の計測が行われた. 以下に観測されたヘイズの波構造とそれによって得られた波構造の動きの速さについての概要を示す (表 1.2).

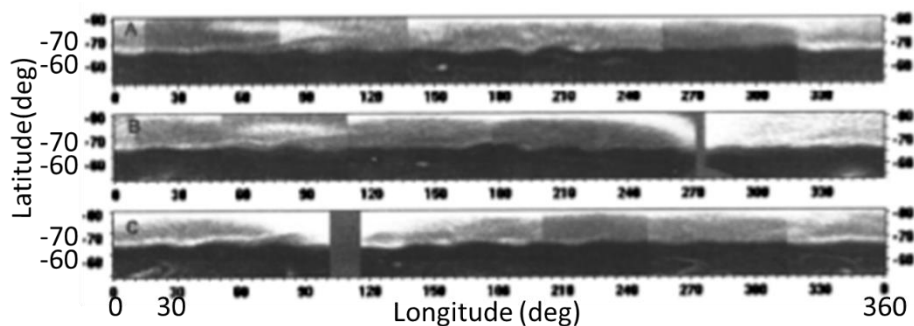


図 1.3 890 nm での木星南極域の経度プロファイル [A. Sanchez-Lavega et al, 1998]. 横軸は経度, 縦軸は緯度を示す.

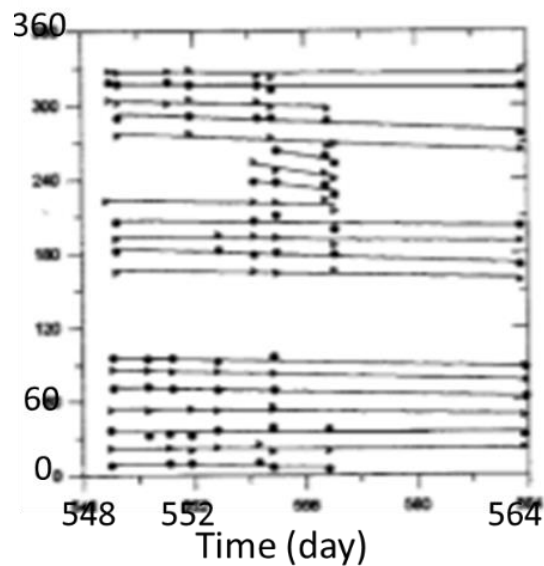


図 1.4 経度プロファイルの正と負のピークの時間変化 [A. Sanchez-Lavega et al, 1998]. 横軸は時間, 縦軸は経度を示す. またグラフ中の丸は波構造の正のピーク, 三角は波構造の負のピークを示し, 異なる時間に得られたピークを実線で結んでいる.

表 1.2 先行研究による木星の観測情報 [N. Barrado-Izagirre et al, 2003]

	1994年	1995年	1997年	1999年	2000年
観測日数	8	3	3	1	5
波数	12	12	13	14	14
波の位相速度(m/s)	-14.2 ± 5	-27.1 ± 5	-16.4 ± 4	-	-32.3 ± 3
背景風速度(m/s)	16.5 ± 5	37.1 ± 5	16.4 ± 5	-	5.0 ± 2
波の伝搬速度(m/s)	2.3 ± 1	10.0 ± 4	0 ± 4	-	5.0 ± 2

また観測波長ごとのメタンに対する感度が異なることを利用して, 観測波長を変えることにより観測できる木星鉛直高度を変えることができる. 先行研究で用いられた波長は 258 nm, 750 nm, 889 nm で, それぞれ 100 mbar (ヘイズ上層), 750 mbar (対流圏下層), 361 mbar (ヘイズの波動) の感度高度を持つ. そのうち 890 nm の波長でのみ南緯 67 度での波構造が確認されていることから, 波の存在する高度が 100- 750 mbar ということがわかった. またこの波構造が南緯 67 度の東風のピーク中を西向きに伝搬していることから, この波構造がロスビー波だということがここで示唆された [N. Barrado-Izagirre et al, 2003].

しかしこれまでの観測は 1, 2 年に 1 回程度の観測しか行えておらず, それより短い数週間から数か月の短期間での波構造の変化がおさえられていない. 木星大気中には数日で消える対流雲などの構造から, 数年ごとに発生する特定の緯度帯での大規模擾乱によるベルトの消滅, 数百年にわたって維持される大赤斑のような構造まで多岐にわたって存在する. 構造を特定するためには波構造の移動速度などといった情報のほかに, 構造がどの程度の

時間にわたって、木星大気中に維持されるのかについて明らかにする必要がある。

1.3 ロスビー波

ロスビー波は地球も含め惑星大気で、コリオリ力が緯度によって異なるというベータ効果を復元力とする自由振動の波の一種である。惑星大気には球面上の回転効果によって存在するロスビー波が知られている。地球の場合には、山脈などの地形効果によって生じたロスビー波がエネルギーを鉛直方向に伝搬し、成層圏突然昇温の引き金になるなどの対流圏・成層圏大気のダイナミクスに影響を与えることがわかっている。ロスビー波は重力波などとともに木星大気ダイナミクスの理解にとっても重要である。

ここで木星極域の波構造をロスビー波と判断するために必要な式を述べる。ロスビー波の分散関係は以下の式で与えられる。

$$l^2 = \frac{\beta_e}{\bar{u} - c} - k^2 - \frac{f^2}{N^2} \left(m^2 + \frac{1}{4H^2} \right)$$

k, l, m : 帯状, 子午, 鉛直方向の波数

c : 波の移動速度

$\bar{u}$: 背景風速度

β_e : 帯状平均風速の勾配

N : ブランドバイサラ振動数

f : コリオリパラメータ(南緯 67 度では)

H : スケールハイト

また帯状平均風速の勾配である β_e は以下の式で与えられる。

$$\beta_e = \beta + \beta_y + \beta_z = \frac{df}{dy} - \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{\rho} \frac{f^2}{N^2} \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

β : 惑星渦度の勾配

β_y : 帯状風からの渦度勾配

β_z : 鉛直のウインドシア

ここで第 1 項は $\beta = \frac{df}{dy} \sim 2.2 \times 10^{-12} m^{-1} s^{-1}$ となる。

次に第 3 項を求めるために必要なブランドバイサラ振動数は以下のように近似できる。

$$N(z, \phi)^2 = \frac{g^2}{C_p T(z, \phi)}$$

ここで木星での南緯 67 度での重力加速度は 26.17 ms^{-2} で一定で, $N^2 \sim 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ となる.

さらに理想気体での密度は以下ようになる.

$$P = \rho R^* T$$

ここでは $R^* = R/\mu$ ($R^* = 8.314 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$, $\mu = 2.309 \text{ g mol}^{-1}$) である. これにより β_e の第 3 項は南緯 67 度及び 350 mbar の高度では $\beta_z \sim 2.4 \times 10^{12} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ となる.

さらにスケールハイト H は

$$H = \frac{RT(z, \phi)}{\mu g}$$

以上より求められたパラメータを用いると, ロスビー波の分散関係式は以下のようにあらわされる.

$$l^2 = \frac{15.97 \times 10^{-12}}{\bar{u} - c} - 3.22 \times 10^{-13} - 1.97 \times 10^{-13} - 1.97 \times 10^{-4} m^2$$

ここで l , $\bar{u}$, c , m が変数となる. 木星極域の波構造がロスビー波であると判別するためにはロスビー波の分散関係式より, 波構造の移動速度 (c) および背景風速度 ($\bar{u}$), 波構造の鉛直方向の波数 (l) 及び緯度方向の波数 (m) の各パラメータが必要となる. 波構造の制約には波構造の伝搬する空間範囲を明らかにする必要がある. [Li et al., 1996].

1.4 木星オーロラ

木星は地球と比較して 1000 倍の強さの磁場を持ち, その磁場は木星とともに約 10 時間の高速回転をしている. この高速回転する木星磁気圏に, 木星の衛星イオの火山活動によって放出されるプラズマや太陽風との相互作用によってオーロラが常時発生し, 木星の両極において, 極を覆うような形で楕円状のオーロラオーバルを形成している. 木星極域を紫外光で観測をすると, 木星大気中の水素原子 (H) や水素分子 (H_2) の磁気圏粒子による直接励起により, このオーバルの発光を確認できる. また, オーロラ領域において H_2 のイオン化により H_2^+ が生じ, H_2 と反応して H_3^+ イオンが生じる. この H_2 や H_3^+ が他の大気分子と

衝突し熱励起されることにより、近赤外の波長でもオーロラを観測することができる。図 1.5 は左がハッブル宇宙望遠鏡の WFPC2 カメラを用いて紫外波長で木星を観測した画像で、右図はハワイ・マウナケアにある NASA の口径 3.0 m 赤外望遠鏡 (IRTF) で撮像されたオーロラオーバルである。このオーロラオーバルは磁極に対して同心円状に広がっているのではなく、楕円のような形で極を覆うように広がっている。経度によっては緯度 50 度の低緯度まで見られる経度と緯度 80 度付近の高緯度にもみ見られる経度が存在するという経度によるばらつきが生じている。また南北両極域でオーバルは見られるが、その広がり方は両半球で異なっており、特に北半球ではより低緯度側にまで広がっていることが分かる [T. Satoh et al, 1999]。

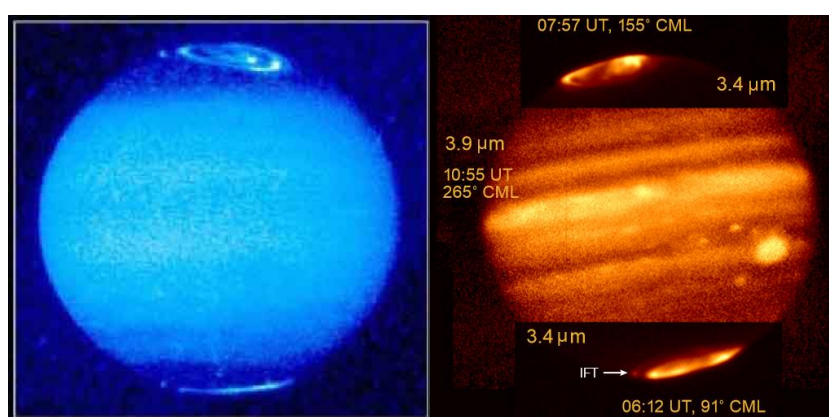


図 1.5 木星紫外オーロラオーバル (左) [<http://www.jpl.nasa.gov/galileo/>] 及び赤外オーロラオーバル (右) [T. Satoh et al, 1999]

成層圏ヘイズ粒子の供給源として、1 μbar の木星磁気圏の高度に存在するとされるオーロラ粒子が候補の 1 つとして考えられている。オーロラ粒子の降下によって高度 100 mbar 付近の成層圏・対流圏上部まで粒子が供給されていて、これが極域成層圏でのヒドラジン (N_2H_4) や多環芳香族炭化水素 (PAH) などと考えられているヘイズ粒子の生成に関わっているというものである。そのためオーロラオーバルとヘイズ構造の形状の比較は極域の磁気圏と成層圏を結びつける重要な情報となる。

1.5 本研究の目的

木星極域の観測は赤道域に比べて事例が少ない。その理由の 1 つとして、観測対象となる木星極域が周辺減光の影響で低緯度側よりも暗くなる点が挙げられる。また 889 nm を中心とする反射率の低いメタンバンドでの観測は、他の波長で観測するよりも相対的に暗くなる点があげられる。波構造を観測するうえで十分な SN 比を稼ぐためには長時間の露光

が必要になるが、地上からの観測は特に大気揺らぎによって数十ミリ秒といった時間でも大きく木星像がゆがみ、先行研究で明らかになった波数 12 の波を解像するだけの必要な空間分解能を得ることができない。そのため探査機や宇宙望遠鏡などによって得られたデータが、これまで主に木星極域の観測結果として使われてきた。しかしこれらの機器を用いて、長期にわたっての惑星モニタリング観測を行うためのマシンタイムを確保するのは容易ではない。

そこで本研究では、地上望遠鏡を用いて、ハッブル宇宙望遠鏡やカッシーニではできなかった数日・数週間以内での波構造の時間変化を追い、対流雲などを含む短期間で消滅するような大気構造の存在の有無を明らかにすることを目的とした。そのため北海道大学大学院理学研究院が所有する 1.6 m 地上望遠鏡及びマルチスペクトル撮像装置 (MSI) を用いて、2011 年から 2015 年にかけて観測を行った。地上望遠鏡を用いるメリットとしては宇宙望遠鏡などに比べてマシンタイムの確保が容易で、数週間から用途によっては数ヶ月以上の時間にわたってのモニタリング観測も行える点が挙げられる。またこの波構造の空間分布を明らかにするために、波構造の鉛直分布と、緯度方向の伝搬の仕方についてを明らかにする。特に鉛直方向の波構造の変化を調べるために、メタン吸収の異なる複数波長で観測を行い、木星極域の成層圏でみられる波構造が、対流圏を含む下層ではどのようにみられるかを明らかにする。

また本研究では、オーロラオーバルと成層圏ヘイズの構造の比較を行う。オーロラオーバルとヘイズ構造はともに異なる木星高度で極を覆うような形で存在している。そのためオーロラ粒子の磁気圏高度から成層圏への降下によって成層圏極域でヘイズ粒子が生成される可能性がある。この仮説を検証するためには、すでに知られているオーロラオーバルの形状に対し、今回の観測によって得られた極域ヘイズ構造の形状の比較を行い、両者の形状の類似性を確かめていく。木星オーロラについては非常に多くの議論がなされているが、オーロラオーバルと成層圏ヘイズを直接的に比較した論文はない。そのためオーロラと成層圏ヘイズとの関係性は明らかになっておらず、今回は両者の関係性について明らかにしていく。

2. 観測

本研究では木星極域成層圏ヘイズの時間変化，および空間変化を調べるため，北海道大学が名寄市に所有する口径 1.6 m のピリカ望遠鏡に取り付けられた **Multi-Spectral Imager (MSI)** を用いて観測を行った．観測に用いた望遠鏡の概要については 2.1 節を，観測装置については 2.2 節を，そして 2.3 節では本研究で行った木星観測の概要について示す．

2.1 北海道大学大学院理学院附属ピリカ望遠鏡

本研究では北海道大学大学院理学研究院が所有するピリカ望遠鏡を使用した．ピリカ望遠鏡は主鏡口径 1.6 m の反射式の可視・近赤外望遠鏡で，惑星観測を主目的とする望遠鏡である．ピリカ望遠鏡を有する北海道大学大学院理学研究院附属天文台は，北海道大学のあゑ札幌市から北へ 200 km ほど離れた北海道名寄市に位置する（北緯 44.4 度，東経 142.5 度，高度 151 m）．名寄の気象コンディショソについて，シーイングサイズはおよそ 1.3"-2.3"（典型値は 1.8"）で気候は 6 月では日本の他の地域でみられるような梅雨がなく，冬季には多くの雪が降るという特徴を持つ．



図 2.1 北海道大学大学院理学研究院附属天文台の外観

2.2 Multi-Spectral Imager

本観測では可視マルチスペクトル撮像装置 (MSI) を用いて木星観測を行った。これは北海道大学大学院理学院惑星宇宙グループが開発したスペクトル撮像装置で、1.6 m ピリカ望遠鏡のカセグレン焦点に設置されている。MSI は電子増倍型 CCD (EMCCD) と液晶波長可変フィルター (LCTF) が用いられていて、これらの装置により短時間露光での多波長撮像が可能になる。EMCCD はサブアレイモードにすることによって読み出し速度を遅くすることができ、露光時間を短くすることが可能になる (本研究では最小 0.011 ms の露光時間で撮像を行った)。LCTF は電氣的に透過波長のピークを高速で変えることができるフィルターで、MSI には VIS と SNIR の 2 つの LCTF が搭載されており、それぞれ 400- 720 nm, 及び 650- 1100 nm である。



図 2.2 ピリカ望遠鏡 (左) 及び Multi-Spectral Imager (右)

表 2.1 MSI に関する情報 [Watanabe et al, 2012]

Parameter	Value
Spectral coverage	360-1050 nm
Field of view(normal resolution mode)	3.3' × 3.3' (0.389" /pixel)
Field of view(high resolution mode)	41" × 41" (0.080" /pixel)
Liquid crystal tunable filters (VIS)	400-720 nm($\Delta \lambda = 10$ nm)
Liquid crystal tunable filters (SNIR)	650-1100 nm($\Delta \lambda = 10$ nm)
Camera (CCD)	Hamamatsu Photonics C9100-13
Array format	512 × 512 pixel (Pixel size: 16 × 16 μm)
Readout modes	EMCCD mode, Normal CCD mode
Pixel clock rates	11 MHz (EMCCD mode only), 2.75 MHz, 0.69 MHz
EM gain	31.9 frames/s (EMCCD mode), 2 frames/s (Normal CCD mode)
Minimum exposure times (full-frame)	31 ms (EMCCD mode), 488 ms (Normal CCD mode)
EM gain	4-1200

2.3 木星観測

今回木星の極域波構造の水平方向の時間変化, さらに鉛直方向の波構造の変化を明らかにするために, メタンバンドである 889 nm, 727 nm, 619 nm の各波長および連続帯波長である 750 nm で観測を行った. また本観測は露光中の大気揺らぎの影響を避けるため, 1 回の露光で必要な SN を稼ぐのではなく, 数十ミリ秒の露光時間で数百, 数千枚の連続撮像を行い, 画像の足し合わせを行った. この数百, 数千枚の 1 波長分の画像セットを取得するのに, 露光時間の 30・100 s に加えて読み出し時間がおおよそ 30・60 s かかっている. 2015 年 4 月 8 日以外の日では 3, 4 波長分の画像セットを連続して取得した. このためおおよそ 5・10 分ほどでこの波長セットの撮像を行い, これを木星観測可能時間中繰り返して観測を行った. また上記の観測セットの取得の他に, おおよそ 1, 2 時間に 1 回程度の割合でバイアスフレームの取得, 及び望遠鏡の焦点の調整とシーイングの調査の目的で天頂付近の恒星の撮像を, 日の出後の観測終了直前にドームフラットの取得を行っている. 観測は 2011 年の 10 月から 2015 年の 12 月まで行われた. この観測期間中はすべて夜間に木星の高度が 30 度以上の時間が 1 時間以上確保できている. そのうち観測サイトの天気及びシーイングを考慮して, 以下の 7 日間で 889 nm の観測波長で極域の波構造が観測された. 以下に本研究に用いた 7 日間のピリカ望遠鏡および MSI をもちいて行われた観測の概要を示す.

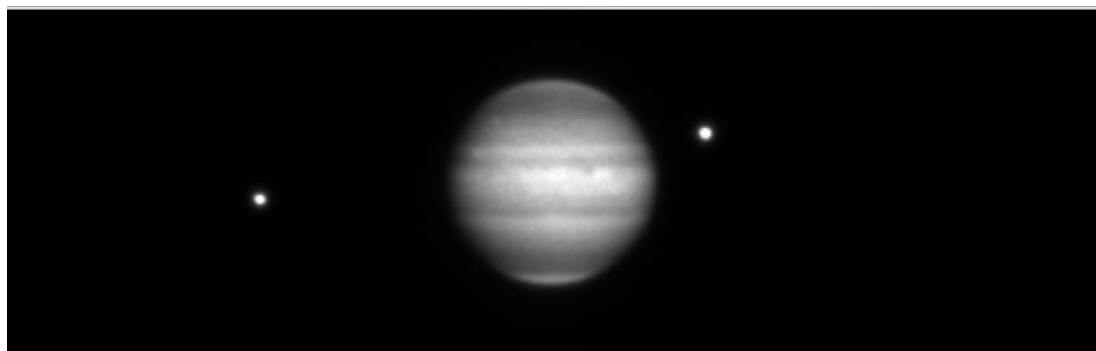


図 2.3 地上望遠鏡で撮像された 889 nm での木星画像 (図中の点光源はガリレオ衛星) 観測視野は縦 62 arcsec (160 pixel), 横 199 arcsec (512 pixel) である.

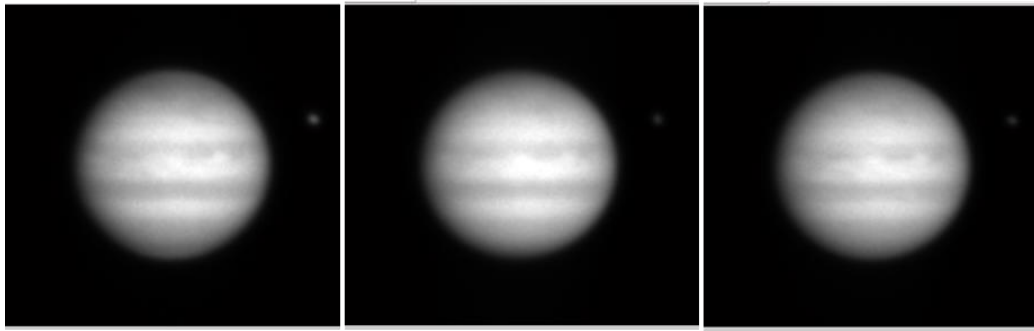


図 2.4 地上望遠鏡で撮像された木星画像. 観測波長は左から 727 nm, 619 nm, 750 nm. 木星を中心に 160×160 pix の範囲を切り取った.

表 2.2 木星観測の概要

Date	Jupiter angular diameter (arcsec)	Seeing size (arcsec)	Wavelength (nm)	Exposure time (ms) × Number of images
Oct. 19 2011	49.5	2.0– 2.6	727, 750, 889	500 ms × 200
Oct. 29 2011	49.6	1.6– 2.0	727, 750, 889	30 ms × 1000
Nov. 16 2011	48.8	2.3– 2.7	727, 750, 889	30 ms × 1000
Mar. 27 2014	38.8	1.8– 2.0	619, 727, 750, 889	30 ms × 1000
Apr. 8 2015	40.6	2.0– 2.2	889	11 ms × 3000
Apr. 9 2015	40.4	1.8– 2.2	619, 727, 750, 889	30 ms × 1000
Apr. 13 2015	39.9	1.8– 2.2	619, 727, 750, 889	30 ms × 1000

3. 解析

本研究では画像データの 1 次処理に天体画像解析ソフトである `iraf` を、それ以降のデータの解析には `MATLAB` のソフトを用いた。画像データの 1 次処理については 3.1 節を、撮像された連続画像の位置の補正については 3.2 節を、連続画像の画質評価及び画像の合成については 3.3 節を、経度プロファイル作成のためのバイキュービック補間を用いたサブピクセル画像の作成は 3.4 節を、極域の経度プロファイルに大きな影響を及ぼす周辺減光の補正の仕方については 3.5 節を、そして同じ日の異なる時間に撮像された画像から得られる経度プロファイルの合成については 3.6 節にそれぞれ述べる。

3.1 木星画像の 1 次処理

本研究ではバイアスフレームとフラットフレームを用いてすべての画像データに対して、画像データの 1 次処理を行った。`CCD` ではデジタル変換後のカウントの値が負にならないようにするため、あらかじめ人為的にバイアス値がのせられている。そのため `CCD` カメラから電荷を読み出す際に、付加されるバイアス値を画像から差し引く必要がある。バイアスフレームは `CCD` に光を与えないように `MSI` の望遠鏡焦点面のアパーチャマスク（焦点面マスク）ホイールを閉じたうえで、設定可能な最短の露光時間で取得する。この際ランダムに発生するばらつきを減らすため、10 枚のバイアスフレームを取得したうえで平均化し、1 枚のバイアスフレームを作成したうえで、生の画像データから差し引きしてバイアス処理を行う。

また `CCD` 内の各ピクセルごとに感度のむらが生じる。これは `CCD` 内のピクセル間の量子効率の差や、光学系の中で視野内の光が均一に透過していない等の理由によるものである。このむらを補正するために、観測視野全体に様に光が当たっているフラット画像からバイアスを引くことにより、各ピクセル間の感度のむらを補正するための観測波長ごとのフラットフレームを作成する。フラットフレームには日没直後または日の出直前のやや明るい空を撮るトワイライトフラットと、ドーム内に光を当てて撮るドームフラットが存在する。本研究では毎晩日の出後の観測終了前にドームスリットを閉じ外部から光が当たらないようにしたうえで、ドーム内のフラット板に均一な光を当て、各波長 15 枚ずつフラット画像を取得した。この 15 枚の画像を平均化しバイアスを引き、カウント値の大幅な減少を防ぐために規格化を行うことで、ドームフラットフレームを作成した。ここまでの処理を行ったフラットフレームをバイアス処理済みの天体画像データから割ることで、感度むらを補正した天体画像を作製した。

$$\text{Flat field frame (i,j)} = \frac{\text{Flat frame (i,j)} - \text{Bias frame (i,j)}}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\text{Flat frame (i,j)} - \text{Bias frame (i,j)})) / nm}$$

$$\text{Jupiter flame(i,j)} = \frac{\text{Raw Jupiter frame (i,j)} - \text{Bias frame (i,j)}}{\text{Flat field frame (i,j)}}$$

(m, n) : CCD 内のピクセル座標 (水平, 鉛直)

(i, j) : 座標 (水平, 鉛直) の指標

frame (i, j) : ピクセル座標 (i, j) の輝度値 [DN counts]

これらの処理は以上のように計算でき, 1 次処理を行った後の画像が作成される. また本研究では対象天体が明るく, 露光時間が数十ミリ秒程度と大変短いため, 暗電流の補正は行っていない.

3.2 連続画像の位置補正

1 次処理済みの木星画像データを MATLAB に読み込んで行列に変換したうえで, 木星中心位置を決定し, 緯度経度情報を取得するために木星のスリット画像を作成する (図 3.1). このスリット画像を作成するために, NASA のウェブページの HORIZONS Tool [<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>] からピリカ望遠鏡での観測日時及び観測サイトの緯度・経度・高度での木星の太陽直下点緯度経度, 地球直下点緯度経度, 見かけの地軸の傾き, 観測視直径及び地球木星間距離の情報を取得した. 得られた情報から各ピクセルでの太陽天頂角と地球天頂角を求め, それぞれの角度の余弦 ($\mu_0 = \cos(\text{太陽天頂角})$, $\mu = \cos(\text{地球天頂角})$) の積の正負から木星スリット画像を作製した (図 3.1 中央). またスリット画像と観測された画像をかけ合わせて得られた全体の輝度値の積分を計算し, その値を水平・鉛直方向に 1 ピクセルずらしたうえで, その値が最大となる位置を木星中心と決定した. 図 3.2 は木星画像を縦横それぞれ 60 ピクセルごと動かして計 3600 個の積分値を計算した図で, 一番大きい値をとる時のシフト量で位置合わせを行う. また $\mu_0 \times \mu$ の値を輝度値とする模擬画像を図 3.1 右のように作成し, 半値幅がシーイングサイズとなるようなガウス分布による畳み込みを行ったものに対して, 位置推定のテストを行った. その結果 1 pixel 以下の誤差で位置推定を行えていることを確認した.

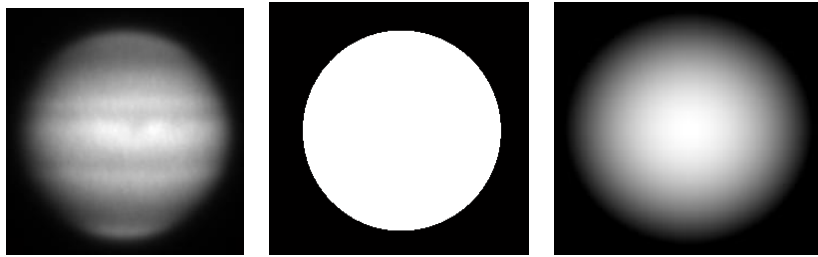


図 3.1 889 nm での木星のスナップショット (左), スリット画像 (中央), 模擬画像 (右)

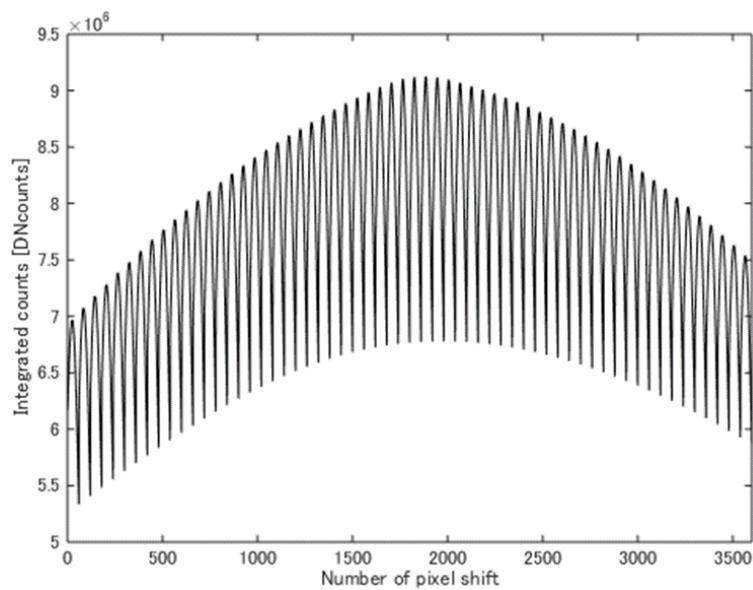


図 3.2 60×60 pixel で木星を動かしたときの積分値の計算結果. 横軸は各ピクセル, 横軸はスリット画像と木星画像との積分値を示している.

3.3. 画像の合成

木星の模様のコントラストがはっきりしている画像を重ね合わせシーイングのいい画像を得るため, 連続画像内の画質の評価を行った. また 3.3.1 節で述べる方法で画像の評価を行い, 画像を並び替えたあと上位 60・300 枚の画像を足し合わせることで, SN 比がおおよそ 300 の 1 枚の木星画像を作成した. この画像を用いて以降の解析プロセスを進める.

3.3.1 合成する画像の選択方法

連続撮像画像の中から地球大気の影響が小さいシーイングのコンディションが良い画像を選択するために, 本研究で撮像されたデータセットのうち大部分は, 画像の輝度の標準偏差と画質の関係をを用いる方法が使われた. これは木星の模様がはっきりと見られる質の

良い画像の場合は模様による輝度の標準偏差が大きく、逆に大気シーイングにより木星模様が平滑化されている場合は、画像全体のコントラストが小さくなるという考えに基づいている。木星模様のコントラストの大きさを求める際に、宇宙部分のカウント値の影響を避けるため、惑星画像の輪郭部分（リム）の領域を除く必要がある。ここでは木星画像における地球天頂角が 50 度以下になる領域のピクセルのカウント値の標準偏差を求めた。この標準偏差が大きいものほど木星模様のコントラストがよりはっきりしているものと見なすことができるので、標準偏差が大きい上位 10 % を用いて木星画像の合成を行った。

ただしこの方法では、ある木星画像内の特定のピクセルがノイズなどで極端に高い値を持つ場合、それに引きずられて画像の標準偏差が大きくなる可能性がある。そのため木星と同じ観測視野にガリレオ衛星が映っている場合、ガリレオ衛星を画質の評価に利用した。ガリレオ衛星は木星画像と同一の視野内に映っている場合、木星を撮像したタイミングの大気の状態をガリレオ衛星の見え方で判断することができる。具体的には、図 2.3 のような木星中心から 1.5 arcmin の MSI の観測視野内にガリレオ衛星を 1 つ以上含み、なおかつ木星面にガリレオ衛星が重なっていない場合に、ガリレオ衛星を点光源と見なして、その点広がり関数の半値幅を計算して、この値が小さいものを合成に用いる木星画像として使用した。ガリレオ衛星のうち最も大きいガニメデでも直径がおおよそ 5300 km であり、地球から観測した場合の最大視直径は 1.7 arcsec となるので、今回の観測では大気シーイングがこれ以上の時は、ガリレオ衛星を点光源とみなすことができる。ガリレオ衛星を 2 つ以上含む場合は、より木星に近いほうの衛星を利用した。また点広がり関数は衛星像のピーク値とそこから横方向に 10 pixel 以内の計 21 pixel のカウント値をプロットし、それに最小二乗法を用いてガウス関数をフィッティングさせて半値幅を計算した。

ただしこの方法はバックグラウンドに対して衛星の明るさのピークが十分大きくなければ、半値幅を計算できない。889 nm の観測波長では画像の木星のカウント値のピークが 4000 DNcounts の場合ガリレオ衛星のカウント値はおおよそ 4000~ 5000 DNcounts となるが、889 nm 以外の波長では画像の木星のカウント値のピークが 4000 DNcounts の時、ガリレオ衛星のカウント値は 200 DNcounts 程となる。木星の明るさに合わせて露光時間及びゲインを決定しているため、889 nm 以外の波長では木星に対し衛星が相対的に暗すぎるので、この方法は使用していない。

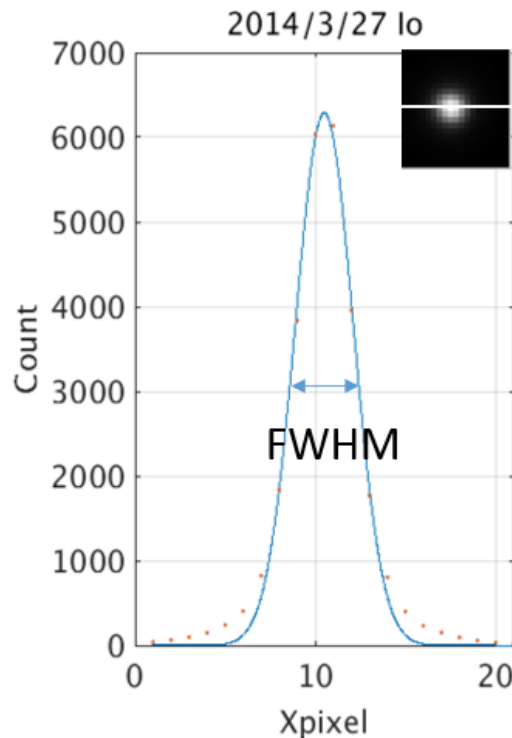


図 3.3 イオの画像（右上）と画像の白線に沿った 1 pixel ごとのプロット（赤点）とイオの点広がり関数（青線）。横軸はピクセル番号，縦軸は各ピクセルでのカウント値を示す。

3.3.2 足し合わせの仕方

合成に用いる画像を選択した後，**Signal-to-Noise** が 300 近くになるように足し合わせを行う枚数を決定する．ここではその枚数をおよそ 60- 300 枚と決定した．ここで SN 比 300 は 1 %の明るさの変化を判断するのに十分な値である．S/N は以下の式のように計算される．

$$S/N = \frac{N \cdot t}{\sqrt{F^2 N \cdot t + n_{pix} (\sigma_r / M)^2}} \times \sqrt{\text{Number of image}}$$

N*: 単位時間当たりの天体からの光電子数

t: 露光時間

F: 過剰雑音係数 ($F=\sqrt{2}$)

σ_r : 読み出しノイズ

M: EM ゲイン

3.2 節で述べたように木星画像の位置補正が完了しているため，そのまま画像間の対応するピクセル同士で画像の足し合わせを行い，足し合わせに用いた画像枚数で割ることによって画像の合成処理を完了した．

3.4 サブピクセル画像の作成

木星画像をある緯度に対して経度 1 度ごとに計算を行い、観測された木星画像上での座標を計算する。この時その座標の輝度値を周囲 4×4 のピクセルを用いてバイキュービック補間を行う。これにより画像のピクセル数を x, y 方向にそれぞれ 2 倍にできる。3 次元フィッティングであるバイキュービック補間の式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} & \text{Dst}(x, y) \\ &= [h(y_1) \ h(y_2) \ h(y_3) \ h(y_4)] \begin{bmatrix} \text{Src}(-1, -1) & \text{Src}(0, -1) & \text{Src}(1, -1) & \text{Src}(2, -1) \\ \text{Src}(-1, 0) & \text{Src}(0, 0) & \text{Src}(1, 0) & \text{Src}(2, 0) \\ \text{Src}(-1, 1) & \text{Src}(0, 1) & \text{Src}(1, 1) & \text{Src}(2, 1) \\ \text{Src}(-1, 2) & \text{Src}(0, 2) & \text{Src}(1, 2) & \text{Src}(2, 2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(x_1) \\ h(x_2) \\ h(x_3) \\ h(x_4) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ここで $\text{Dst}(x, y)$ は補間によって推定される輝度値を、 $\text{Src}(i, j)$ は求める座標 (x, y) の周辺の輝度値を、 $x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4$ はそれぞれ以下のように求める位置から参照する位置までの距離を表す。

$$\begin{cases} x_1 = 1 + x - [x] \\ x_2 = x - [x] \\ x_3 = [x] + 1 - x \\ x_4 = [x] + 2 - x \\ y_1 = 1 + y - [y] \\ y_2 = y - [y] \\ y_3 = [y] + 1 - y \\ y_4 = [y] + 2 - y \end{cases}$$

ここでは $[x], [y]$ はそれぞれ x, y の小数部分の切り捨てを示す。

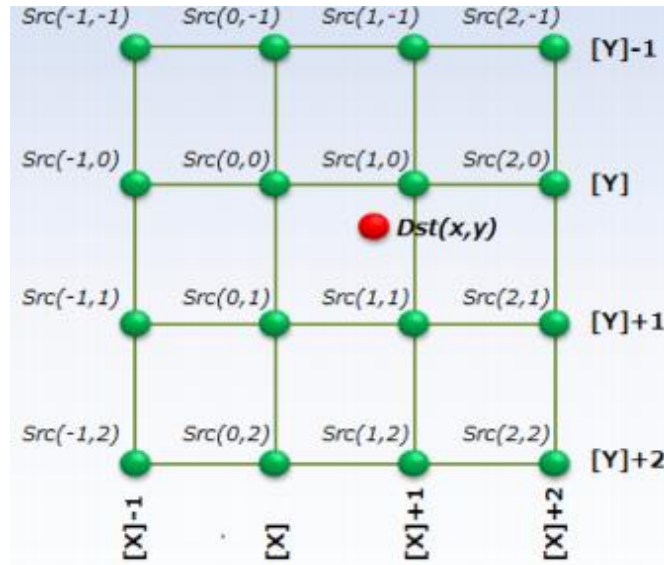


図 3.4 バイキュービック補間に用いる各プロット

また関数 $h(t)$ の定義は, sinc 関数 ($\text{sinc}(t)=\sin(\pi t)/\pi t$) をテイラー展開により三次の項まで近似した関数で, 以下のように表される.

$$h(t) = \begin{cases} (a+2)|t|^3 - (a+3)|t|^2 + 1 & (|t| \leq 1 \text{ のとき}) \\ a|t|^3 - 5a|t|^2 + 8a|t| - 4a & (1 < |t| \leq 2 \text{ のとき}) \\ 0 & (2 < |t| \text{ のとき}) \end{cases}$$

ここで本研究では $a=-1$ とした.

またプロファイルの補間を行ったときに図 3.5 左のように経度幅 5 度前後の波模様が見えるが, これはプロファイルを作成したときに見える人工的な模様である. これを取り除くために経度 11 度でプロファイルに対し移動平均フィルタをかける (図 3.5 右).

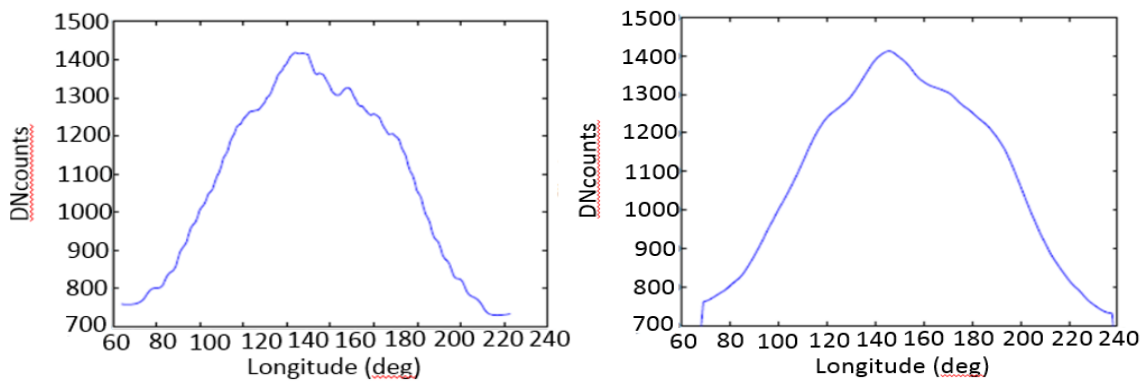


図 3.5 経度プロファイル (左) と 11 度の移動平均をかけたプロファイル (右). それぞれ横軸は経度, 縦軸はカウント値を示す.

3.5 周辺減光の補正

地球から木星を見た場合、観測中心から木星のリムに向かうに従ってより多くの木星大気を通過することになるため、中心からリムに向かうに従って木星大気による減光が発生する。これを周辺減光といい、このとき本来の木星でみられる模様による輝度値の変化以上に周辺減光の効果による変化が大きくなるため、これを補正する必要がある。本研究では惑星の周辺減光の補正のため、期間内に撮られた同観測波長の画像すべてを積算して得られた擬似的な長時間露光画像を作成し、経度プロファイルの取得を行う。それに経度 11 度ごとの移動平均フィルタをかけた周辺減光曲線を作成する。積算時に異なる画像間の輝度のレベル調整も行った。

また各木星画像から経度プロファイルを取得し、それに対し周辺減光曲線を経度ごとの最小二乗法を用いてフィッティングを行う。この経度プロファイルと周辺減光の経度ごとの二乗平均 (RMS) が最小になるように、経度プロファイルを定数倍しレベルの補正を行い、周辺減光曲線で割ることによって、周辺減光の補正を行ったプロファイルができる。

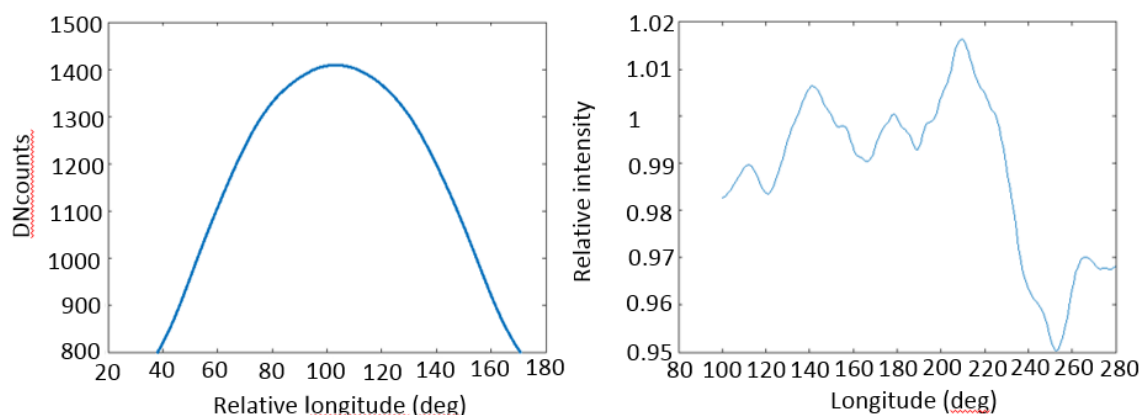


図 3.6 周辺減光曲線 (右) 及び周辺減光補正を行った後の経度プロファイル (左). 横軸はともに経度で、縦軸右はカウント値、左は相対強度を示す。

3.6 木星経度プロファイルの作成

極域ヘイズの波構造を見るために、特定の緯度に沿った明るさの経度プロファイルを作成する。ここではより多くの経度での明るさを比較するため、同じ日の異なる時間に撮像された木星プロファイルの合成を行う。時間により木星高度及び観測サイトのシーイングの値は異なるため、各画像でプロファイルを作成する際に用いることのできる経度範囲を決定し、そのうえでプロファイルの合成を行う。3.6.1 節では合成を行う前の各画像から切

り取る経度幅の決定を, 3.6.2 節では画像ごとに得られた経度プロファイルを 1 つに合成する手法について述べる.

3.6.1 プロファイルの経度幅の決定

観測によって得られた木星画像では, 観測中心経度からリムに行くにつれ経度方向の木星模様の分解能は低くなる. そのため見たい模様を解像できる範囲のみ経度プロファイルの作成に用いていく必要がある. 経度プロファイルを作成するのに用いる観測中心からの経度幅は, 波数 12 の波を解像できる値に決められる. この経度幅は以下の式のように, 観測時の木星高度での大気シーイングと木星視直径および経度プロファイルを求める木星緯度に依存する.

$$\frac{\text{Seeing Size}}{\text{Angular diameter} * \cos(\text{Latitude})} = \frac{\sin(x + 7.5) - \sin(x - 7.5)}{2}$$

x : プロファイルの合成に用いる経度幅

またシーイングの測定は天頂付近の星を 1, 2 時間おきに撮像し, その点広がり関数の半値幅で天頂のシーイングを計算しているが, 観測時の木星の高度はおよそ 30-65 度となり, エアマスの影響を天頂より多く受ける. そのため木星高度でのシーイングは木星高度による補正を行う必要がある.

$$\text{Seeing Size} = \text{Seeing Size (zenith)} \times \cos^{3/5}(\text{elevation})$$

また木星リムの周辺減光の補正の難しさから, 用いる経度幅の最大値は観測中心から経度 30 度とする. そのためここでは 1 枚の画像から取得できる経度プロファイルは最大で経度 60 度分となる. またこの式を用いると木星高度でのシーイングが 2.3 arcsec (観測視直径 38-40 arcsec 場合: 2014 年, 2015 年) 及び 2.8 arcsec (観測視直径 48-50 arcsec の場合: 2011 年) よりも大きい場合, x の値が正にならない. この場合はシーイングが大きく波数 12 の波構造が解像出来ないことを示すので, 本研究ではこれに該当するデータは用いない.

3.6.2 木星経度プロファイルの合成

このような経度プロファイルを観測のセット数だけ作成した. 図 3.7 右は数分ごとに得られた画像から作成した横軸が経度, 縦軸が相対的な輝度値の経度プロファイルを並べたものである. 経度の値が大きくなる向きが西側である. 木星は約 10 時間で 1 回転自転をしているため, 同じ日の観測であっても時間経過とともに観測中心経度がずれていく. この木

星の自転によって時間の経過とともに見ている経度が変わっていくことを利用して、同じ経度での明るさの平均値をとることで、木星の波構造の経度プロファイルを作成する。図 3.7 右は作成された経度プロファイルで、横軸が経度、縦軸が相対的な輝度値となっている。図左の赤線は図中央の経度プロファイルを作成するのに使った木星面上の位置を示している。エラーバーは経度 3 度ごとの領域での輝度の標準偏差を示している。図 3.7 右上から経度 50 度付近ではどの時間でもまわりの経度より暗く、そのため平均をとると、明るさの波構造では波の負のピークになっている、エラーバーも波の振幅以下になっている。

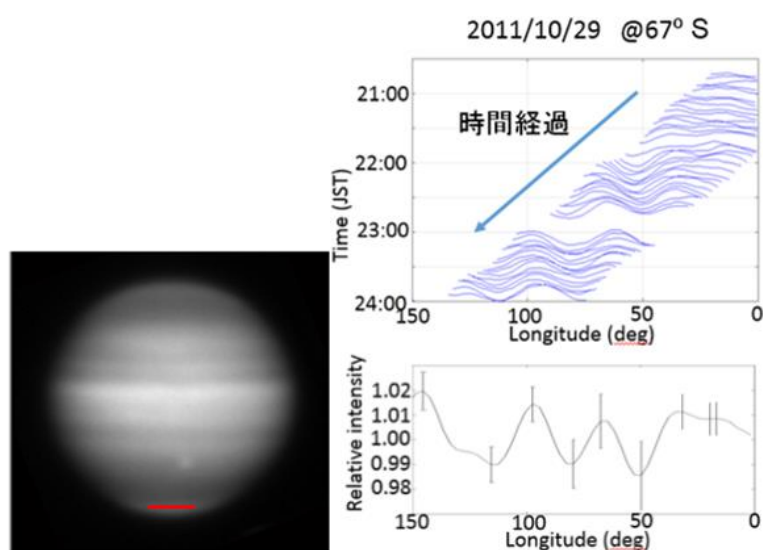


図 3.7 木星面からの経度プロファイルの切り出し（左）と自転による経度方向のプロファイルの移動（右上）、同じ経度での明るさを平均化したプロファイル（右下）。右のグラフはそれぞれ横軸は経度、縦軸は相対強度で、右上は時間に沿って並べた。

4. 結果

今回示す結果は 3 章で行われた画像処理と解析を行った経度プロファイルを使う。2011 年 10 月 16 日, 10 月 29 日, 11 月 16 日, 2014 年 3 月 27 日, 2015 年 4 月 8 日, 2015 年 4 月 9 日及び 2015 年 4 月 13 日の 3 期間の経度プロファイルの比較による波構造の時間変化については 4.1 節に, 2011 年 10 月の南北両極域の波構造の緯度ごとの違いについては 4.2 節に, そして 2011 年 10 月の木星の鉛直方向の波の伝搬については 4.3 節に記す。また 4.4 節では近赤外波長で見られるオーロラオーバルとヘイズの形状を比較するため, オーロラオーバルと地上望遠鏡で撮像された木星画像の比較を行う。

4.1 波構造の時間変化

木星極域存在する経度方向の波の構造を見ていくため, それぞれの観測期間中における経度プロファイルを作成する。本研究では 2011 年から 2015 年の観測のうち波構造が確認できた ①2011 年 10 月 19 日, ②2011 年 10 月 29 日, ③2011 年 11 月 16 日, ④2014 年 3 月 27 日, ⑤2015 年 4 月 8 日, ⑥2015 年 4 月 9 日, ⑦2015 年 4 月 13 日の 7 日についての経度 3 度ごとの経度プロファイルについて掲載する。図 4.1 のエラーバーは合成前の画像間での経度 3 度毎の領域に含まれる値の標準偏差を示す。また図 4.1 で細い線になっている経度は, その経度をプロットするのに用いたデータ数が 2 点以下の領域を示す。

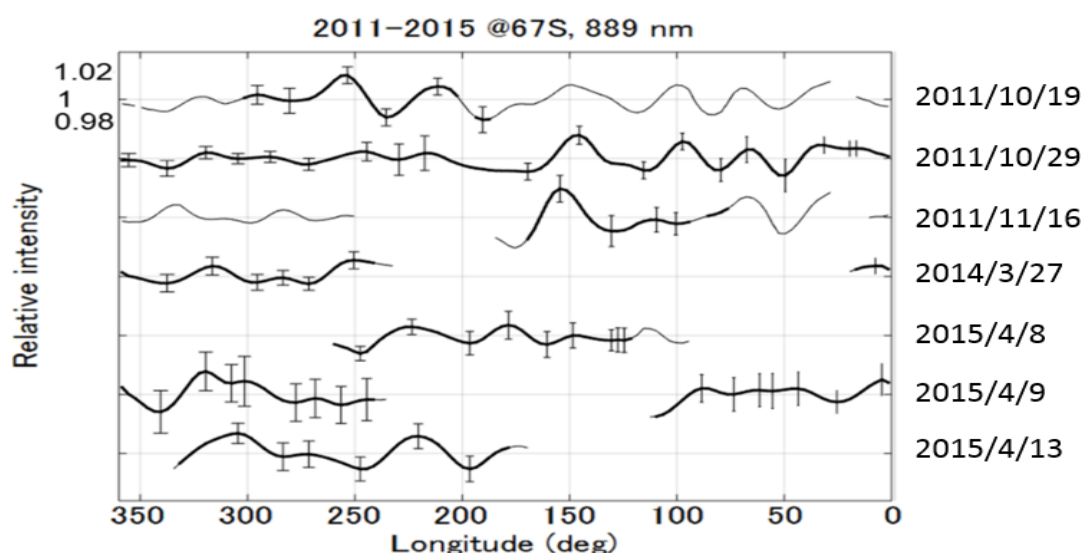


図 4.1 889 nm での木星極域 (南緯 67 度) での経度プロファイルの時間変化。横軸は経度で縦軸は相対強度を示す。また上から 2011 年 10 月 19 日, 10 月 29 日, 11 月 16 日 2014 年 3 月 27 日, 2015 年 4 月 8 日, 4 月 9 日, 4 月 13 日に撮像された。

図 4.1 より, この 7 日の経度プロファイルでは波構造の振幅がエラーバー以上になっている地点が多い. 波の振幅は 1・2 %程度と木星画像の SN 比およそ 300 と比較しても大きく, 波の振幅はノイズに対して十分信頼できる値を持っている.

またエラーバーの大きさに対して, 波の振幅のピーク値が十分大きい経度が 3 つ以上隣接している 2011 年の 10 月 29 日の経度 50・150 度及び 2015 年 4 月 13 日の経度 200・250 度から, 波の正のピーク同士及び負のピーク同士の間隔はおよそ経度 30・50 度と見積もることができた. これが全経度にわたって広がっているとすると, この波構造の波数は 8・12 程度と計算できる.

観測結果から, 2011 年 10 月 19 日の経度 210 度と 250 度で波の正のピークが, 経度 190 度と 235 度で負のピークが見える. またプロットするのに用いたデータ数は 2 点以下と少ないが, 同じ日には経度 70 度, 100 度, 150 度で正のピークが, 経度 50 度, 80 度, 120 度で負のピークが見える. 2011 年 10 月 29 日では経度 100 度と 150 度に正のピークが, 経度 50 度, 80 度, 120 度に負のピークが見える. この 2011 年 10 月の 2 期間の経度 50・120 度の間の計 5 つの波のピークは, それぞれ同じ経度に存在しているように見える. また 2015 年 4 月 8 日及び 13 日ではそれぞれ経度 220 度に正のピークが, 200 度, 250 度に負のピークが見られる. 2015 年のこの 2 日についても 3 点以上波のピークが隣接しており, 波構造の経度方向の移動は確認できなかった. またこの経度 250 度付近は 4 月 9 日ではエラーバーは大きい, 相対輝度は 1 を切っており相対的に暗い領域であると言える.

ただし波のピークが一致しているところだけではなく, 2 週間近くのうちに経度プロファイルが大きく変化しているところもある. 2011 年 10 月 29 日と 11 月 16 日のそれぞれ経度 80・130 度では, 10 月 29 日の経度 80 度でみられた負のピークや経度 100 度でみられた正のピークなどが 11 月 16 日のほうでは全く見られなくなっている. このような 2 週間余りで経度プロファイルが大きく異なっているような場合も存在する.

4.2 波構造の鉛直方向の変化

本研究の観測では極域ヘイズがはっきりと見られる 889 nm のほかに, それ以外のメタンバンド波長 (727 nm, 619 nm) 及び連続帯波長 (750 nm) についての観測も行い, 889 nm での波構造と比較する. 観測波長ごとにメタンに対する吸収が異なるため, 観測している高度も観測波長によって異なる. 図 4.2 の黒線はヨーロッパ南天文台で分光撮像された木星のスペクトルで, 今回観測に用いた 4 波長での反射率を示している. ここで示される反射率の値から, 各観測波長での感度高度は上から 889 nm (361 mbar), 727 nm, 619 nm, 750 nm (750 mbar) の順番になっている.

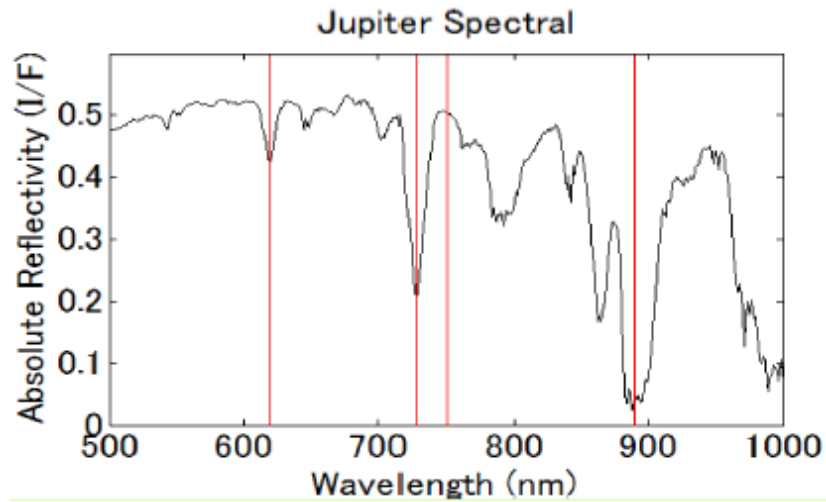


図 4.2 可視・近赤外波長領域の木星スペクトル. 横軸は波長, 縦軸は絶対反射率を示す. 赤線は今回観測を行った 619 nm, 727 nm, 750 nm, 889 nm をそれぞれ示す. [Karkoschka, 1994]

ここでは各日ごとに 3 ないしは 4 観測波長の南緯 67 度での経度プロファイルを示す. 以下は図 4.1 の波構造の時間変化で示した 7 日のうち, 889 nm のみ撮像された 2015 年 4 月 8 日を除く 6 日の 3 波長 (889 nm, 727 nm, 750 nm) ないしは 4 波長 (889 nm, 727 nm, 619 nm, 750 nm) の経度プロファイルである. ここでは経度 3 度ごとにプロットを行い, プロットに用いたデータ数が 2 点以下の経度を赤線で示した.

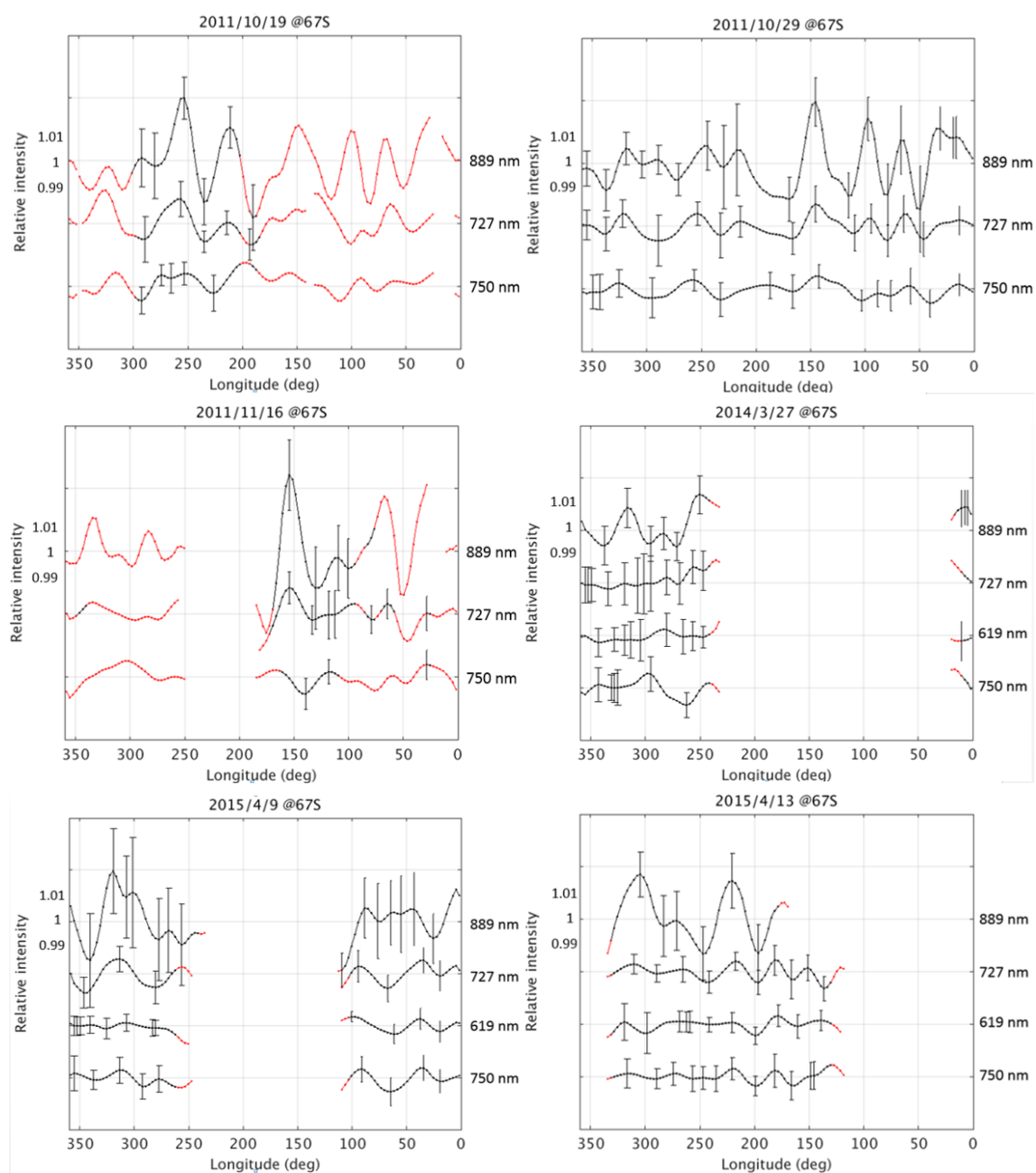


図 4.3 南緯 67 度での各観測波長の経度プロファイル。それぞれ左上から 2011 年 10 月 19 日, 10 月 29 日, 11 月 16 日, 2014 年 3 月 27 日, 2015 年 4 月 9 日, 4 月 13 日に撮像された。赤線はデータ数が 2 点以下の経度を示している。

観測結果から 889 nm で見られた波のピークのうち、特に大きいものは 727 nm の観測波長でも確認することができる。具体的には 2011 年 10 月 19 日の経度 250 度付近に見られる正のピーク, 2011 年 10 月 29 日の経度 150 度付近のピーク, 2011 年 11 月 16 日の経度 150 度付近のピーク, 2015 年 4 月 13 日の経度 200, 220 度付近のピークなどで, 889 nm 波長でのこれらのピーク値は 1.015 以上と比較的大きい。727 nm ではこれらの経度でのピ

ーク値は大きく減少しているものの、エラーバーより大きく、振幅は十分信頼できるものとみなすことができる。そのほか 889 nm でみられる波構造のうちいくつかのピークでは 727 nm でも同じ経度にピークがみられる。

889 nm と 619 nm, 750 nm での波構造を比較した場合も、波のピークの経度が一致しているところがあった。具体的には 2011 年 10 月 29 日の経度 150 度付近のピークや、2015 年 4 月 13 日の経度 200 度付近のピークである。これらのピークもすべて 889 nm の観測波長で得られた波構造のピークに比べて、ピークの値は減少をしている。ただしこれらのピークは 727 nm の波構造でも確認でき、また 727 nm と比較して 889 nm と同じ経度にピークがある場合が明らかに少ない。889 nm での正または負のピークが 727 nm の観測波長でも見られ 619 及び 750 nm では見られなかったというパターンが多く、すべての観測波長でピークがみられた場合も存在するが、889 nm でみられた波構造が 619 及び 750 nm でみられて、727 nm でみられなかったパターンは存在しない。特に 2015 年 4 月 9 日は経度によって鉛直方向の波構造の分布がはっきり異なり、経度 250 度から 360 度にかけて、889 nm, 727 nm と 619 nm, 750 nm の波構造は大きく異なっているのに対し、経度 0 度から 100 度では 889 nm ではエラーが大きいものの、4 波長全てにおいて波構造が類似している。このような経度による、異なる観測波長間の波構造の類似性の違いが発見された。

このため今回の観測波長ごとの経度プロファイル全体としては、889 nm と 727 nm の経度プロファイルは比較的一致していて、889 nm と 619 及び 750 nm では経度プロファイルが一致している場合と一致していない場合がある。

4.3 波構造の緯度方向の変化

南緯 67 度の木星極域の波構造が低緯度側にどれだけ広がっているかを確かめるために、889 nm での木星の波構造の経度プロファイルを 7 日の各観測日ごとに南緯 0 度から南緯 67 度まで 11 の緯度帯で作成をした。

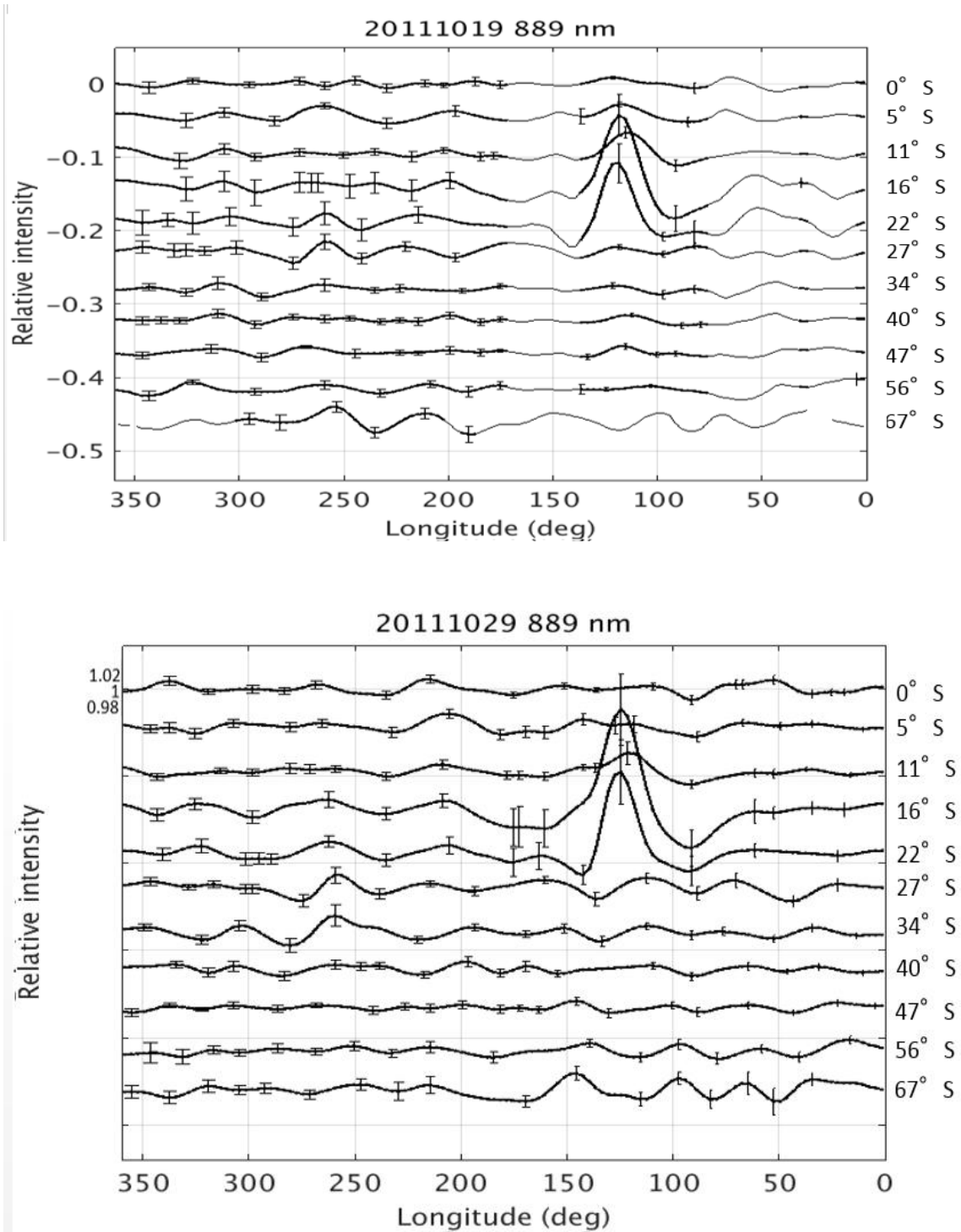


図 4.4a 889 nm での木星経度プロファイルの緯度方向の変化 (2011 年 10 月 19 日, 10 月 29 日). 横軸は経度, 縦軸は相対強度を示す. また細い線はデータ数が 2 点以下の経度を示している.

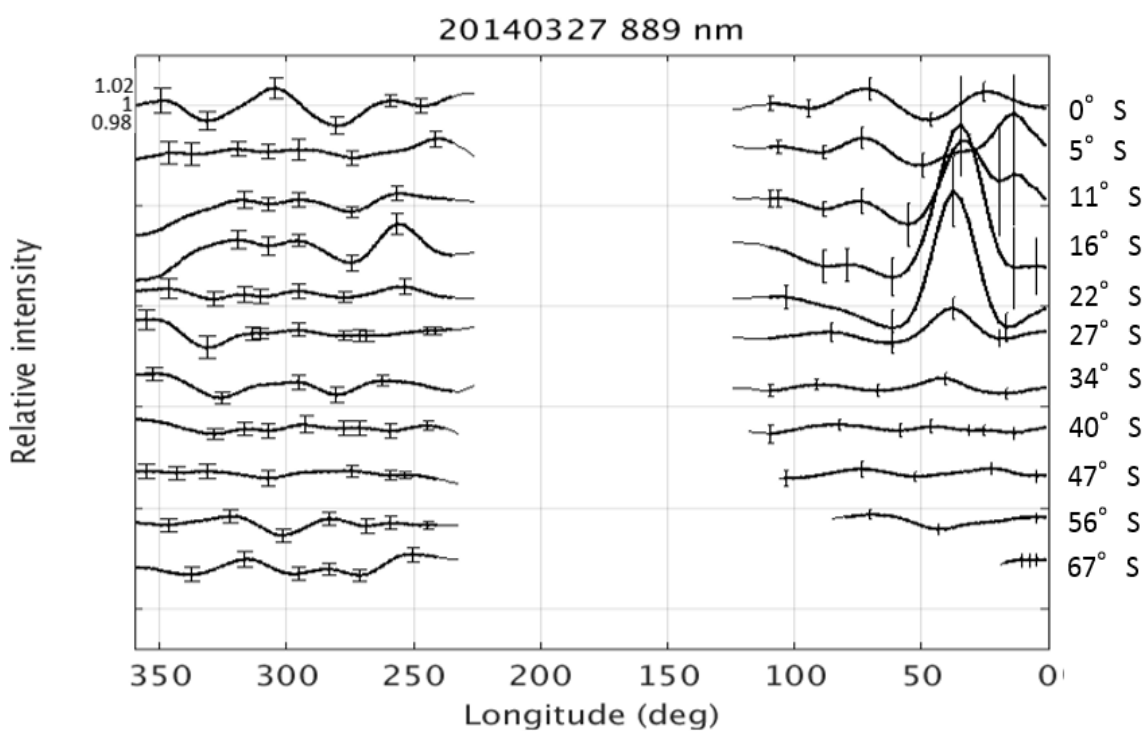
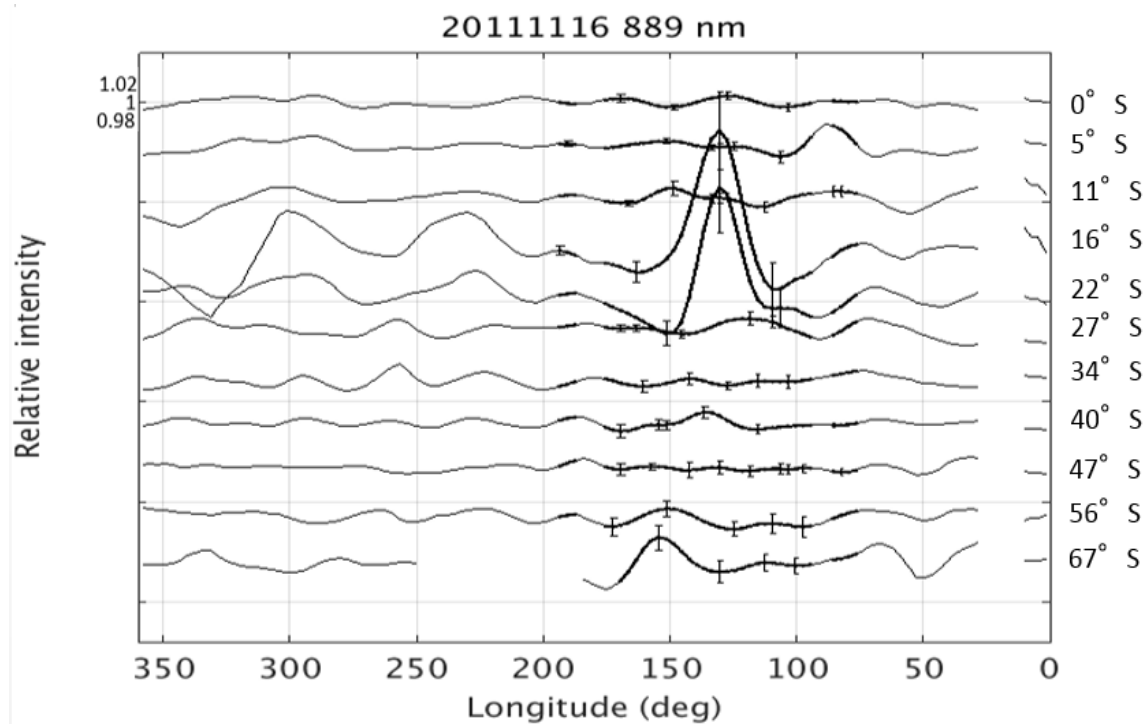


図 4.4b 889 nm での木星経度プロファイルの緯度方向の変化 (2011 年 11 月 16 日及び 2014 年 3 月 27 日)

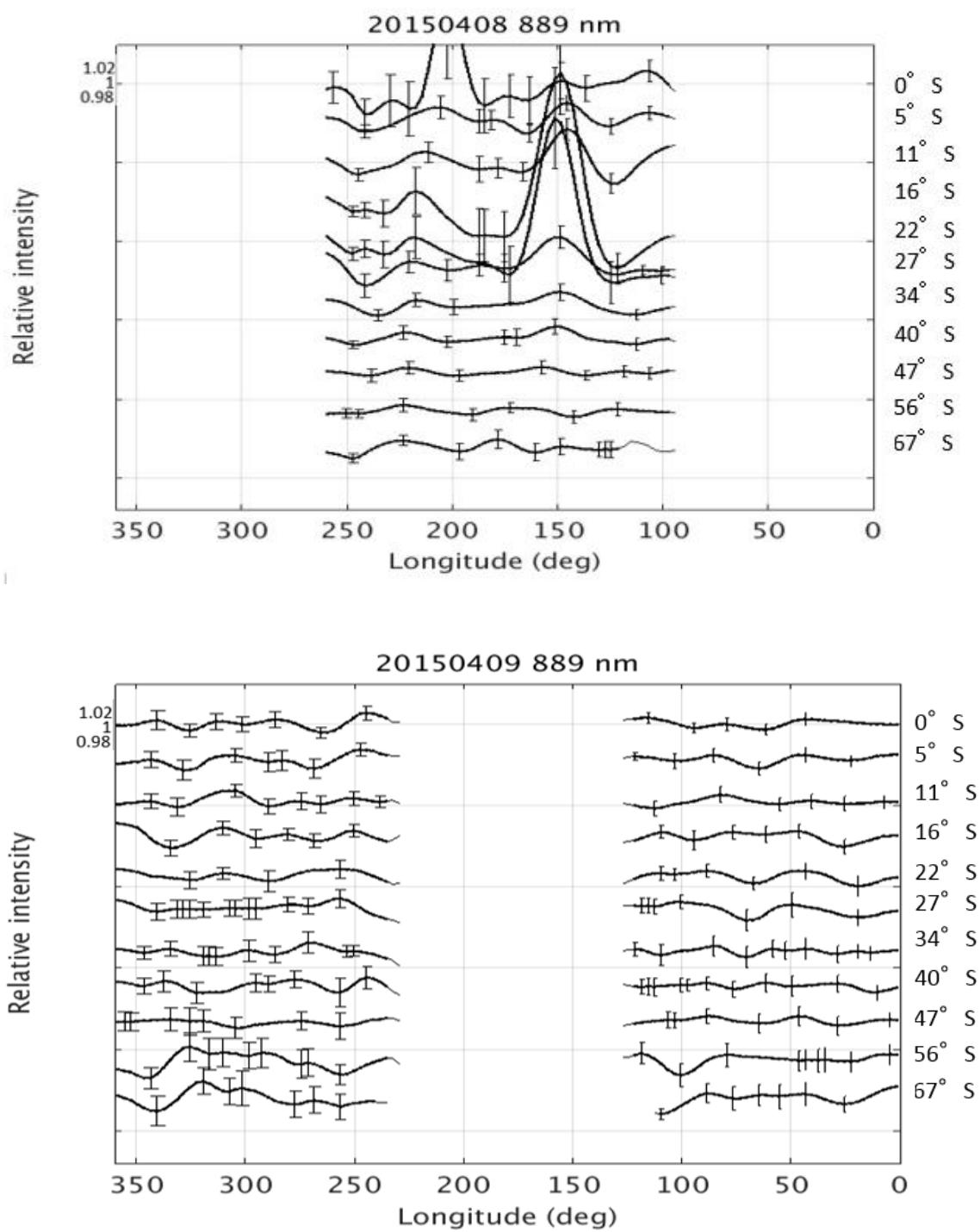


図 4.4c 889 nm での木星経度プロファイルの緯度方向の変化 (2015 年 4 月 8 日及び 2015 年 4 月 9 日)

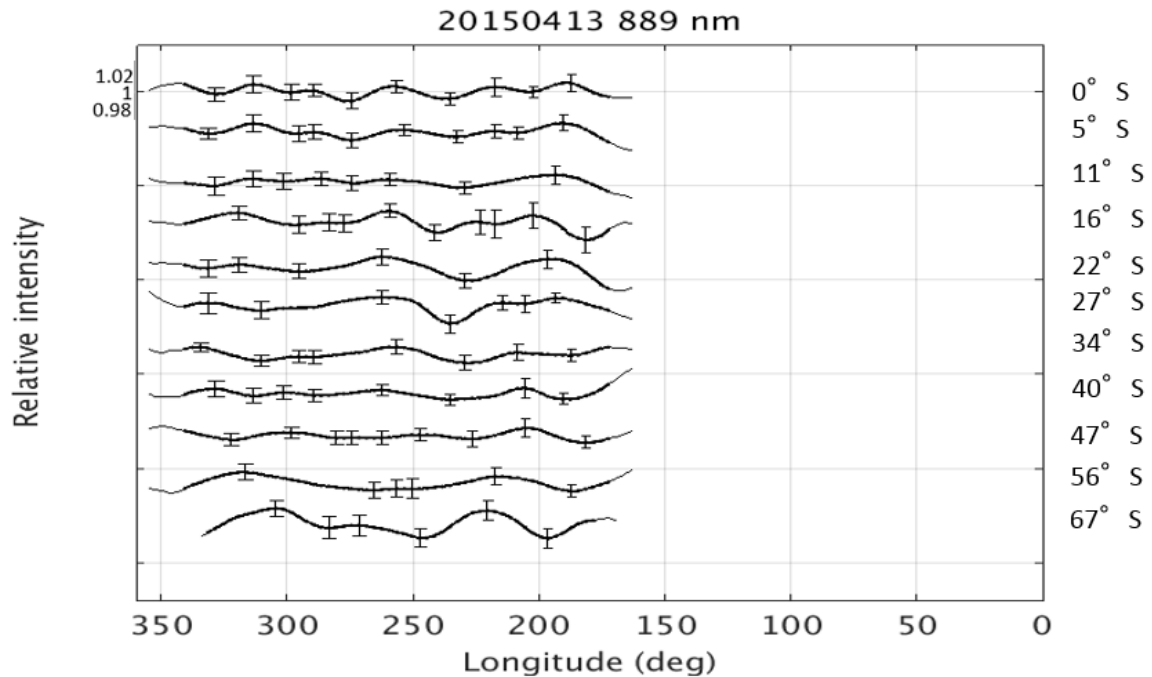


図 4.4d 889 nm での木星経度プロファイルの緯度方向の変化 (2015 年 4 月 13 日)

2014 年 3 月 27 日の経度 20 度から 100 度をはじめとして、同じ日でも高緯度になるほど経度プロファイルの幅が狭くなっているところが存在する。これは経度プロファイルを作成する時、3.6.1 節で紹介したように緯度によって要求される分解能が変化するためである。また 2011 年 10 月 19 日の南緯 16 度、22 度のプロファイル中の経度 120 度付近での 10 % 以上の周りの経度帯と比較しての極端な増光などをはじめとして、図 4.1 でみられた波のピークの 1・2 % 近くの振幅に比べて非常に大きい振幅をとっているところが、緯度 27 度以下の低緯度帯でみられる。これは南緯 10・20 度付近に存在する大赤斑によって明るく見えている場合と、ガリレオ衛星が木星面に映ることによって衛星の明るさが経度プロファイルに反映されている場合の 2 通りがある。

ここでは南緯 67 度でみられた波構造が、どこまでの低緯度領域で見られるかについて明らかにする。そのため南緯 67 度帯の波構造とその他の緯度帯での比較を行う。ここでは特に 2011 年 10 月 29 日の経度 50・100 度付近でみられる南緯 67 度での隣接する 4 つの波のピークと、2015 年 4 月 9 日の経度 320・360 度付近でみられる南緯 67 度での隣接する 2 つの波のピークが南緯 56 度でもそれぞれ南緯 67 度と同じような経度でみることができる。このとき南緯 40 度及び南緯 47 度などのより低緯度側ではこのようなピークは見られなかった。このように南緯 67 度と南緯 56 度の緯度の経度プロファイルは比較的似ているとみなせ、それより低緯度側の南緯 47 度や南緯 40 度のプロファイルはあまり似ていない。

4.4 極域ヘイズの空間分布

南北両極域のヘイズの空間分布を確かめるため、889 nm 波長で観測された木星をカラータームで表示した画像を示す。ここでは今回経度プロファイルを作成した 7 日のうち、最も大気シーイング及び木星視直径の条件が良い 2011 年 10 月 29 日の木星画像を使用する。全経度に対しおおむね 40・50 度の等間隔になるように 8 方向（経度 1, 45, 90, 140, 181, 221, 269, 314 度）から観測を行ったデータを用いた。図 4.5 は各経度での木星画像で、すべて 3.4 節で述べたサブピクセル処理まで完了している。各画像は南北両極域のヘイズ構造内のカウント値の変化が強調されるようカラータームで表示されており、カウント値が大きい明るく見える領域ほど赤色に、暗く見える領域ほど青色になる。各画像が撮像されたときの木星高度が異なることにより地球大気による減光量が一定ではないため、カラーバーの値は画像ごとに大きく異なっている。また木星中心経度は点線で示しており、画像は向かって右側が東、左側が西である。この色の変化によるヘイズ構造の経度ごとの見え方の違いからヘイズの空間分布を求めることができる。

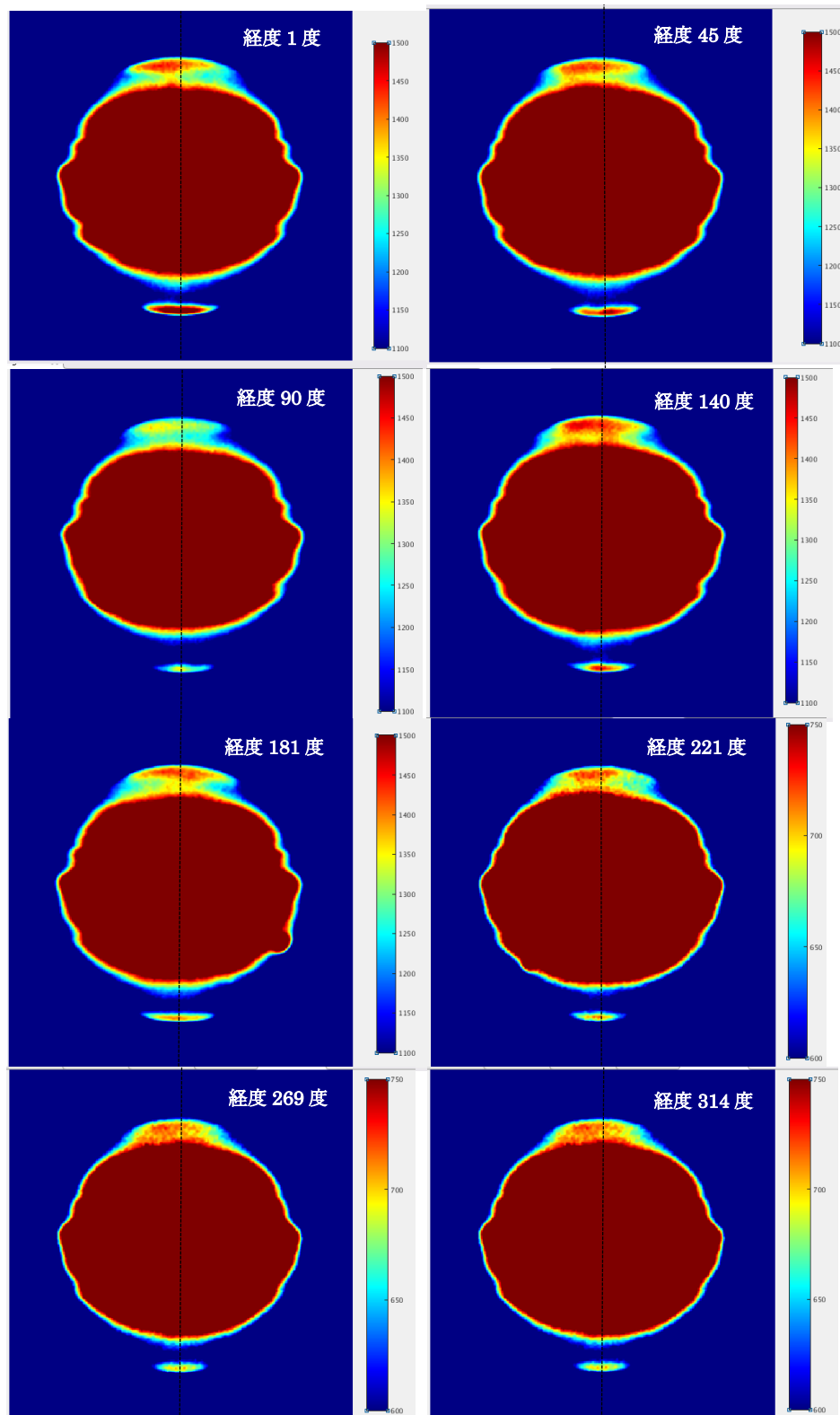


図 4.5 各観測中心経度での 889 nm 観測波長での木星画像をカラータームで表示した..
各画像内の点線は木星の観測中心経度を表している.

図 4.5 の 8 枚の木星画像から、北半球のヘイズ構造は観測中心経度に対して線対称に分布をしているのではなく、観測中心より東側と西側で非対称にヘイズによる明るい構造が分布している。特に極域の中でも明るく見える赤色から黄色の領域に関しては、北半球では経度 181 度では観測中心経度より東側に広く見られ、それ以外の経度に関しては西側に偏って分布しているように見える。また赤色と黄色の領域だけではなく、明るさはより小さいが周囲に比べて明るく光っていることを示す水色から緑色の領域も含むと、経度 45, 90, 140, 181 度を中心とする画像では、観測中心経度より西側が東側に比べてこの領域が低緯度側にまで広がっていることが確認できる。経度 1, 221 度では東側のほうが西側に比べて明るい領域が低緯度側に見られる。また南半球に関しては北半球ほど極域ヘイズの各画像の経度中心から東西での明るさの分布の非対称性は見られない。

このように画像ごとにヘイズによって明るく見える領域は、観測中心経度に対して東西非対象に分布をしている。そのため南北両半球において極域ヘイズは極に対して同心円状に広がっているのではなく、経度に対してある程度偏った分布をしていると言える。

5. 議論

5.1 経度プロファイルの時間変化

図 4.1 の経度プロファイルの時間変化の結果から、2011 年と 2015 年ではそれぞれ 10 日と 5 日の時間間隔で波構造の取得に成功した。この短期の間では同じような経度に波構造のピークが連続して 3 つ以上みられるところも存在し、波構造は定常的に存在していると考えられる。しかし経度プロファイルが大きく異なっているところが 2011 年の 10 月 29 日と 11 月 16 日の 2 週間余りの間に見つかり、これに関しては波構造が短期の間に崩れていると言える。ここで波構造が崩れている理由としては、889 nm の観測高度である 361 mbar 以高の上部対流圏に局所的で短期の対流雲のような構造が発生したためと考えられる。このような構造は先行研究では指摘されていない。この構造を明らかにするためには局所的な構造がみられるときのプロファイルと、その前後の波構造のみがみられるプロファイルの計 3 点の異なる日にとられたデータセットが必要になっていく。

またカッシーニ及びハッブル宇宙望遠鏡で得られた結果と大きく違う点として 2 点がある。今回観測された波構造の波数が 8・12 と先行研究で明らかになった波数 12・14 と比較すると小さくなっている。13 以上の波数構造に関しては 3.6 節で述べたように波数 12 の波構造までを解像出来るように経度プロファイルの切り出しを行ったため、木星観測視直径と観測サイトのシーイングを考慮した結果、波数 13 以上がみられない場合も存在することが考えられる。またカッシーニで撮像されたときは波構造のピーク値は最大 5 % の振幅を持っていたのに対し、今回の観測では最大 2 % となっている。これに関しては今回の観測は地上観測で、地球大気のシーイングによって観測中心経度でも経度方向に 6 度ほどの分解能しか持たないため、ピーク値が経度 6 度分の範囲の明るさの影響でなまされたことが理由として挙げられる。

5.2 波構造の鉛直・緯度変化

本研究では 1.3 節で述べたように、波構造の伝搬する空間範囲について制約をする必要がある。ここでは成層圏でみられる波構造の鉛直方向の伝搬について対流圏高度までどのように変化しているか、また木星極域でみられる波構造がどの緯度帯まで見られるかを明らかにする。これにより波構造の鉛直方向と緯度方向の理解につなげる。

まず波構造の鉛直方向の広がりに関しては、観測波長によるメタン吸収の違いを利用して異なる高度での観測を行った。今回用いた 4 波長において観測波長と対応する木星高度

の関係が、889 nm では一番高い成層圏高度に対応し、鉛直下向きに 727 nm, 619 nm, 750 nm (対流圏深層) の順番になっている。図 4.2 より、観測時期によって 889 nm と 727 nm の波構造が類似していることが確認された。一方 750 nm 及び 619 nm と 889 nm は似ている場合と似ていない場合がある。特に 2015 年 4 月 9 日では、経度によって各波長間の波構造の類似性は異なる。図 4.2 のように、経度 0°- 100° で波構造が連続して見えている理由としては、2 つの可能性があげられる。1 つは経度 250°- 360° と同じように、各観測波長での波構造がそれぞれの高度の情報を反映していて、成層圏から対流圏雲層まで波動がつながっている可能性がある。また、727 nm の観測波長でみられている高度で厚い雲がみられ、619 nm 及び 750 nm で観測を行っても、それより下の高度は観測できていない可能性もある。この 2 つの可能性について、観測結果からどちらか断言することはできない。

波構造の緯度方向の広がりに関しては、図 4.4 の経度プロファイルの緯度方向の変化より、南緯 67° と南緯 56° の波構造がよく似ており、南緯 47° や南緯 40° といったより低緯度側の領域では、極域ヘイズでみられた波構造とは異なるプロファイルをとっていることが明らかになった。また図 4.4 の緯度帯の間隔は赤道から極を等間隔に 10 分割する値になっており、木星視直径(40°- 50°)と観測サイトのシーイング(約 1.6°- 2.3°)の条件下で、隣り合う緯度帯同士が干渉しないぎりぎりの幅になっている。そのため、この幅より細かく波構造の低緯度側の境界を決定することはできない。この点から極域ヘイズの波動は南緯 56° から南緯 47° の間に波構造の低緯度側の境界があると考えられる。

5.3 極域ヘイズの非対称性

南北両半球の極域において各経度において東西の非対称性がみられたヘイズ構造の空間分布と、オーロラの作るオーバルとの形状の比較を行う。ここではハワイのマウナケアにある NASA の所有する口径 3 m 赤外線望遠鏡 (IRTF) で、1996 年に撮像された 3.43 μm の近赤外波長で観測できる H_3^+ の放射の空間分布を用いて、オーロラオーバルの空間分布を判断する。そしてオーロラオーバルと図 4.5 で示したピリカ望遠鏡で 2011 年以降に撮像された 889 nm での極域ヘイズの空間分布の比較を行う。オーロラオーバルは木星の磁気圏に同期しているため時間変化をせず、System III の座標系に沿って固定されている。

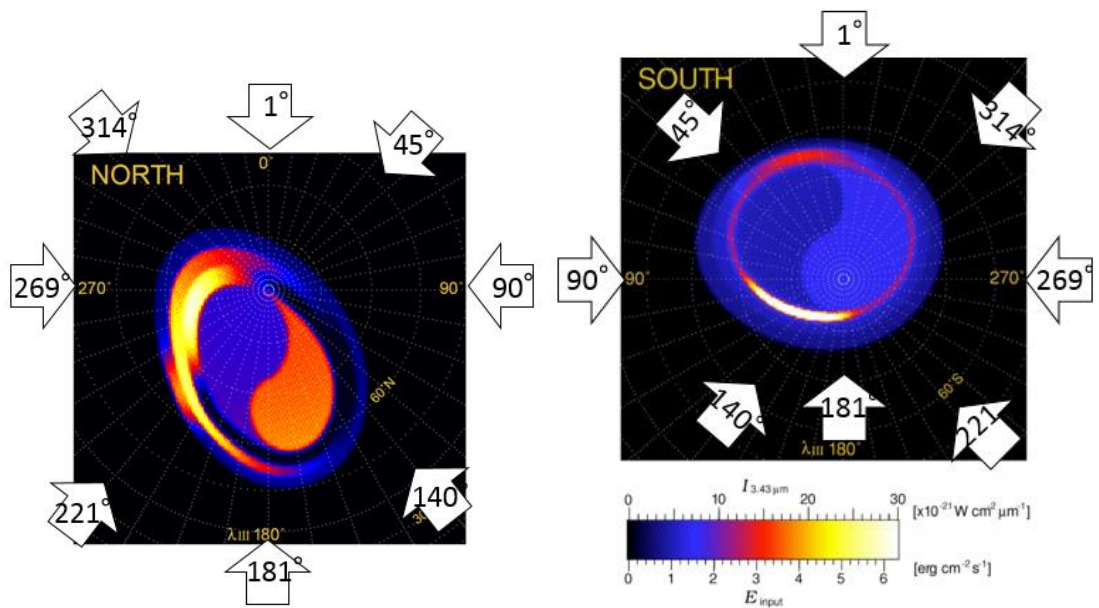


図 5.1 南北両極域の $3.43 \mu\text{m}$ で観測された H_3^+ 密度の空間分布. 白矢印は図 4.5 の計 8 枚の画像の観測中心経度を示す. [T. Satoh and J. E. P. Connerney, 1999]

図 5.1 より青色から黄色で示されるオーロラオーバルは極に対して同心円状に広がっているのではなく、楕円状に広がっている。経度 $1, 45$ 度では北緯 80 度付近の高緯度がオーバルの境界になっているが、経度 180 度付近では北緯 50 度の低緯度までオーロラオーバルがみられる。南半球では経度 45 度付近では南緯 60 度までオーロラオーバルがみられるが、経度 180 度付近では南緯 75 度までしかオーロラオーバルは見られない。

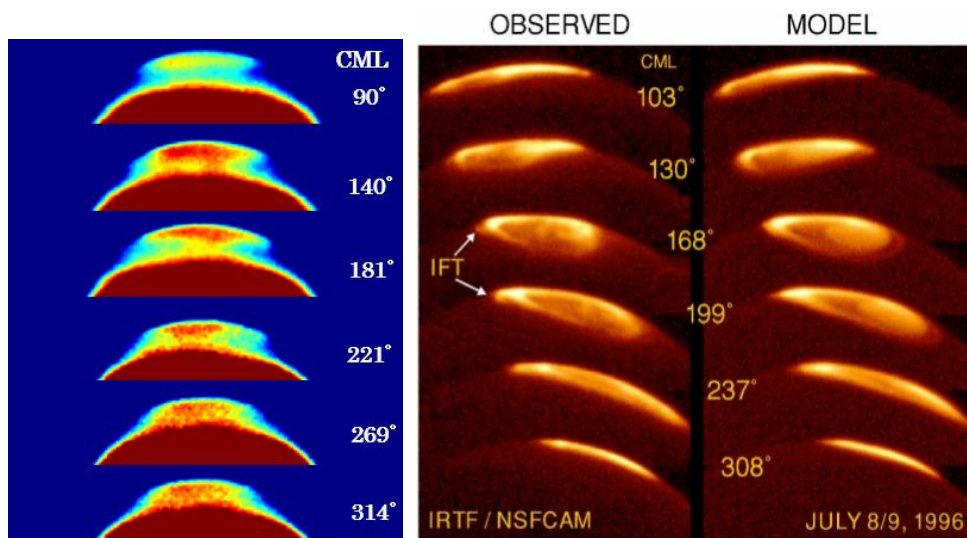


図 5.2 北半球の極域ヘイズの空間分布 (左) とオーロラオーバルの空間分布 (右) [T. Satoh and J. E. P. Connerney, 1999]

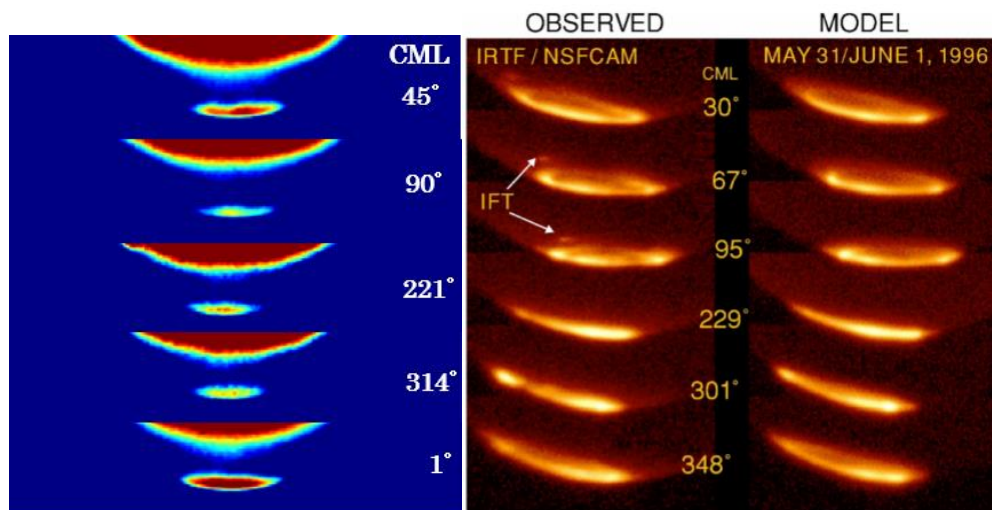


図 5.3 南半球の極域ヘイズの空間分布（左）とオーロラオーバルの空間分布（右）[T. Satoh and J. E. P. Connerney, 1999]

図 5.2 は図 4.5 の極域ヘイズの北半球を切り取って示した空間分布と、観測及びモデル計算によって示された赤外オーロラオーバルの空間分布をそれぞれ近い中心経度で比較している。ここでは極域ヘイズの中心経度 90 度と 140 度及びオーロラオーバルの中心経度 103 度と 130 度は、ともに西側のほうが低緯度側に広がって見える。またオーロラオーバルは中心経度 168 度と 199 度からだんだん東のほうに明るく広がっており、その間である極域ヘイズの中心経度 181 度では東のほうにヘイズが広がっている点と一致している。ただしヘイズの場合、各画像でオーロラオーバルほど極端な東西の非対称性は見られない。

図 5.3 は図 5.2 と同様に南半球でオーロラオーバルと極域ヘイズのそれぞれの空間分布を比較している。極域ヘイズは度の観測中心経度でもほぼ東西に対称に分布をしている。それに対しオーロラオーバルは中心経度 95 度では東西対称に、それ以外の経度では西側が東側に比べて低緯度側にもみられる。

北半球においてオーロラオーバルと極域ヘイズの空間分布が近いことが、今回の観測から明らかになった。特にオーロラオーバルがより低緯度側に見られた経度では、極域ヘイズもほかの経度と比較して低緯度側まで広がって見える場合がいくつかあった。ただしオーロラオーバルの外縁部は経度によって北半球では北緯 50・80 度、南半球では南緯 60・75 度と大幅な開きがあるものの、極域ヘイズではここまでの差は見られなかった。これについては磁気圏高度 (1 μ bar 以上) からオーロラ粒子が成層圏のヘイズ高度まで降下した際に、成層圏高度での大気の流れによって粒子が攪拌され、経度による極域ヘイズの外縁部の緯度の違いがある程度解消をしたことによるものと考えられる。そのためヘイズの生成にオーロラ粒子がかかわっている可能性があり、また極域ヘイズの分布は上層の磁気圏でのオーロラオーバルの分布に加え、成層圏での大気の流れの影響を反映したものになることが考えられる。

6. 結論

今回の研究では木星極域でみられる波構造の性質と短期間に存在する構造の有無の確認、及び極域ヘイズとオーロラオーバルの関連性について調べるため、ピリカ望遠鏡を用いて 2011 年から 2015 年に木星観測を行った。観測されたデータの内気象条件や観測時の大気シーイング等を考慮したうえで、889 nm の観測波長で波構造がみられた 7 日間のデータに関して、特定の緯度での経度プロファイルを作成した。またオーロラオーバルとの比較のためヘイズ構造の空間分布を確かめる目的で、8 つの観測中心経度から撮像された木星画像をヘイズ構造の空間分布が判断しやすいようにカラータームで表示を行った。6.1 節では波構造の時間変化について、6.2 節では鉛直・緯度方向の波構造の伝搬について、6.3 節ではオーロラオーバルとヘイズ構造のそれぞれの空間分布の比較とその結果についてまとめる。

6.1 経度プロファイルの時間変化

これまでの木星極域大気の研究は、ハッブル宇宙望遠鏡やカッシーニといった探査機に限られている。これらはマシンタイムが限られるため、1, 2 年ごとに 1 回程度の観測しか行えず、それ以下のタイムスケールの構造はこれまでの研究で触れられてはいない。そのため今回地上望遠鏡を用いて数日・数週間以内での波構造の時間変化を追い、対流雲などを含む短期間に存在する大気構造の存在の有無を明らかにする。今回の研究では 2011 年から 2015 年にかけての期間観測を行い、そのうち 7 日で先行観測にみられたような波構造を得ることができた。

観測結果から、2011 年や 2015 年内の数日から数週間の間で波のピークの経度が一致している波構造が明らかになった。しかし一部で 2 週間余りのうちに波の振幅がみられなくなった経度も存在するため、このような場所では局所的な及び短期の雲対流などの構造が存在すると考えられる。ただしこの構造を明らかにするためには局所的な構造がみられるときのプロファイルとその前後の計 3 点の異なる時間のデータセットが必要になっていく。

6.2 波構造の空間分布

波構造の伝搬の範囲を明らかにするために、メタンに対する吸収が異なる 4 波長での観測によって 889 nm 波構造より下層での経度プロファイルを作成し、波構造の鉛直伝搬について確認を行った。南緯 67 度より低緯度側でも明るさの経度変化を作成することで、889 nm の波構造の低緯度側の境界について求めた。

観測結果から 889 nm でみられる波構造と、727 nm でみられる波構造は多くの期間で類似していることが明らかになった。一方 889 nm と 619, 750 nm の間では波構造が似ているところと似ていないところの両方がみられる。特に 2015 年 4 月 9 日をはじめとして、波構造の鉛直方向の類似性が経度によって異なることが明らかになった。ただし観測高度が 1 番上の 889 nm から観測高度が最も下の 750 nm の 4 つの観測波長で波構造が同じに見える箇所は、それぞれの観測高度の情報を得た結果か、または途中の高度で光学的に厚い雲があり、より低層の情報が遮られているかの判断はできない。緯度方向の低緯度側の波構造の境界に関しては、889 nm 観測波長でみられる南緯 67 度の波構造は南緯 56 度では同じような波構造がみられる。南緯 47 度及びそれより低緯度側では経度プロファイルは大きく異なっており、南緯 47- 56 度が波構造の低緯度側の境界だということが示された。このように水平スケールに関しても波構造の伝搬の制約をかけることができた。

今回波構造の緯度分布を求めるうえで、南緯 67 度での波構造の低緯度側の境界を求めていったが、地球大気のシーイングの影響で望遠鏡の分解能が大きく制限されるため、波構造の高緯度側の境界を求めることはできなかった。今回の方法で南緯 67 度より高緯度の明るさの経度分布を導出するには、角度分解能を上げて波のピークをより高精度でとらえるようにすることが考えられる。マシンタイムと望遠鏡の分解能の向上を両立させるためにはいくつかの方法が考えられる。1 つは地上望遠鏡に対し補償光学のような地球大気による星像の乱れをとらえ、可変形鏡によって揺らぎを補正する技術を地上望遠鏡に導入することでの解決が考えられる。また気球望遠鏡による高度 30 km の成層圏からの観測によって、地表と比較して地球大気の影響を 100 分の 1 以下に抑えることができる。どちらの場合でも回折限界近くの性能で観測を行うことができ、今回用いた 1.6 m 口径の望遠鏡の場合、889 nm の観測波長で 0.14" 程度の角度分解能になり今回の観測の 10 倍以上の分解能を達成できる。0.14" の角度分解能の場合、波数 12 の波では南緯 89 度まで解像出来るため、南緯 67 度でみられる波構造の高緯度側の境界を明らかにすることができる。

6.3 オーロラオーバルと木星極域ヘイズの比較

オーロラオーバルと木星極域ヘイズの空間分布の比較を調べるために、NASA の 3 m 赤外線望遠鏡 (IRTF) の 3.43 μm の波長で観測された両極域の木星画像と、ピリカ望遠鏡 889 nm 波長で観測された木星極域ヘイズの画像を用いる。赤外波長での木星極域の H_3^+ 放射の空間分布は極を中心に同心円状に分布をしているのではなく、楕円状に分布をしている。オーバル外縁部の緯度は経度によって北半球では緯度 30 度分、南半球でも緯度 15 度分の違いがみられる。これと比較するために今回得られた 889 nm 観測波長での異なる中心経度の木星画像を用いた。その結果北半球では各画像で中心経度に対して東西非対称のヘイズ構造が確認され、オーロラオーバルと同じような経度に対してのヘイズ構造の外縁

部の緯度の変化がみられた。ただし完全に一致をしているのではなく、オーロラオーバルよりも経度に対しての変化は小さく、ヘイズの分布は同心円状に近い分布をしている。この点から木星極域では磁気圏高度 ($1\ \mu\text{bar}$ 以高) からオーロラ粒子が成層圏のヘイズ高度まで降下した際に、成層圏高度に存在する大気の流れによって、経度による極域ヘイズの外縁部の緯度の違いがある程度解消をしたと考えられる。このようにオーロラオーバルと成層圏ヘイズの空間分布からヘイズの生成にオーロラ粒子が関わっている可能性がある。

謝辞

本研究を進めていくにあたり、様々な方からのご支援をいただきました。

指導教員である高橋幸弘教授には研究者としての心構えや研究発表に対する姿勢などサイエンスを追求し研究活動を行う上で大切なことをお教え頂きました。

渡辺誠特任助教にはピリカ望遠鏡と観測装置の操作方法を丁寧に教えて頂き、また望遠鏡に関連する光学系の知識についてゼミを通じて教えて頂きました。

惑星宇宙グループの探査惑星ユニットのスタッフである渡部重十客員教授、佐藤光輝講師、栗原純一特任教授、石田哲郎特任助教をはじめとする方々には、セミナーでの活発な議論を通じて私の研究の糧となるアイデアを頂きました。

惑星宇宙グループの卒業生である濱本昂先輩や尾崎彰人先輩には、私が本研究を始める以前からのピリカ望遠鏡で撮像された木星画像データを頂き、また画像の解析方法や研究に関するご意見をいただくなど大変お世話になりました。

今井正堯先輩、同期の合田周平君をはじめとして、惑星宇宙グループの皆様には観測や研究を進めていくうえで必要な知識やアイデアを頂きました。

名寄市立天文台の佐野康夫氏をはじめとする天文台職員の方々には、観測及び観測期間中の生活面に対して大変お世話になりました。

また最後に私の研究生生活の支えとなった家族に感謝いたします。

この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

参考文献

- Atreya, S. K., A. S., Wong (2005), Coupled clouds and chemistry of the giant planets - a case for multiprobes, *Space Sci. Rev.*, 116, 121-136.
- Atreya, S. K., M. H. Wong, T. C. Owen, H. B. Niemann, and P. R. Mahaffy (1997), Chemistry and clouds of Jupiter's atmosphere: A Galileo perspective, in *The Three Galileos: the Man, the Spacecraft, the Telescope*, p. 249.
- Barrado-Izagirre, N., A. Sanchez-Lavega, S. Perez-Hoyos, R. Hueso. , 2008. Jupiter's polar clouds and waves from Cassini and HST images: 1993-2006, *Icarus*, 194, 173-185. NASA/HORIZONS (<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>)
- N. Barrado-Izagirre, J. F. Rojas, R. Hueso, A. Sanchez-Lavega, F. Colas, J. L. Dauvergne, D. Peach, and the IOPW Team., 2013. - Jupiter's zonal winds and their variability studied with small-size telescopes
- Law, N. M., C. D. Mackay, J. E. Baldwin (2006), Lucky imaging: high angular resolution imaging in the visible from the ground, *Astronomy and Astrophysics*, 446, 739-745.
- Li, L., Ingersoll, A. P., Vasavada, A. R., Porco, C.C., West, R. A., Flasar, F. M., 2006b. Waves in Jupiter's atmosphere observed by the Cassini ISS and CIRS instrument. *Icarus* 185, 416-429.
- Sanchez-Lavega, A., and R. Hueso., 1998. A system of circumpolar waves in Jupiter's stratosphere, *Geophysical Research Letters*, 25, 4043-4046.
- Sanchez-Lavega, A. (2011), *An Introduction to Planetary Atmosphere*
- Takafumi Temma, 2005, Vertical structure modeling of Saturn with high spectral resolution imaging, A dissertation submitted to the Graduate School in partial fulfillment of the requirements for the degree Doctor of Philosophy
- Takehiko Satoh and J. E. P. Connerney, 1999. Jupiter's H^{3+} Emissions Viewed in Corrected Jovimagnetic Coordinates, *Icarus* 141, 236-252.
- Watanabe, M., Y. Takahashi, M. Sato, S. Watanabe, T. Fukuhara, K. Hamamoto, A. Ozaki (2012), MSI: visible multi-spectral imager for 1.6-m telescope of Hokkaido University, SPIE, 8446, 84462O-84462O-10.

- 木村竜治 (2004) 地球流体力学入門
- 杉山耕一郎, 中島健介, 小高正嗣, 石渡正樹, 倉本圭, 高橋芳幸, 林祥介 (2011) 木星の大気構造と雲対流