

ピリカ望遠鏡による木星極域における 成層圏ヘイズの波構造の観測

北海道大学 理学部 地球惑星科学科
惑星宇宙グループ

学籍番号 22100222

合田 雄哉

指導教官：高橋 幸弘 教授

平成 26 年 1 月 30 日

要旨

木星極域ではエアロゾル粒子からなるヘイズが成層圏に存在し、メタン吸収波長で観測することによって極の周りに存在するキャップ状構造を見ることができる。カッシーニ Imaging Science Subsystem(ISS) やハッブル宇宙望遠鏡を用いて木星極域ヘイズの観測がおこなわれ、このキャップ状構造の縁は南緯 67 度付近で波構造をとっていることが判明した。これらの観測によって、890nm で観測された南緯 67 度の波構造の動きの速さが観測が行われた年によって大きく異なり、また 100- 750mbar の範囲にこの波構造が限定されることが示された。しかしこれらの観測は 1 年に 1 回程度の限られた期間でのみ行われており、鉛直方向の波構造の下限及び緯度方向の波構造の広がりとは確認されていない。特にこの波構造がロスビー波ではないかと先行研究で示唆されており、波構造の鉛直及び緯度方向の範囲を限定することは、ロスビー波の判別のためにも重要である。

そのため本研究では木星観測のためにマシンタイムを確保しやすい、そして波長を切り替えて観測できるピリカ望遠鏡を用いて木星極域ヘイズのモニタリング観測を行った。またこれまでほとんど行われていなかった木星北極域についても解析を行い、木星極域における波構造の南北の対称性の有無を確かめた。観測によって得られた画像データは iraf を用いて生画像の 1 次処理を行った後、MATLAB を用いて連続撮像によって得られた各画像の選択と重ね合わせを行い、周辺減光の補正を行うことで、特定の緯度における輝度の相対値の経度プロファイルを取得した。これらの観測により地上望遠鏡を用いても木星極域の波構造を観測でき、また 2011 年 10, 11 月の波構造の移動速度を 2m/s, -1m/s と計算することができた。さらにこの波構造の経度プロファイルを異なる緯度ごとにそして異なる観測波長ごとに作成することによって、南北 67 度で見られる波構造がそれぞれ 52S, 42S まで見られ、高度ごとの広がりを推察できた。そして南北両半球における緯度方向及び鉛直方向の波構造の広がりの違いが示された。

今後さらにモニタリング観測を継続して行っていくと同時に、2011 年以来行われていないメタンバンドのスキャン観測を行っていくことで、波構造の鉛直方向の時間変動を明らかにする。

目次

1	序論	4
1.1	木星大気の概要	4
1.2	木星極域ヘイズの先行研究	7
1.3	ロスビー波	9
1.4	本研究の目的	10
2	観測	11
2.1	北大ピリカ望遠鏡	11
2.2	Multi-Spectral Imager(MSI)	12
2.3	木星観測	13
3	データ処理及び解析	15
3.1	画像データの1次処理	15
3.2	画像の合成	16
3.3	連続画像の位置補正	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	21
4	結果	22
4.1	波構造の時間変化	22
4.2	南北両極域での波構造の違い	23
4.3	木星の鉛直方向の波構造の広がり	25
5	議論	28
6	まとめと今後の展望	30
	謝辞	31

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を 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 節で本研究の目的とその新規性についてを述べる.

1.1 木星大気の概要

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 倍の半径と質量は 318 倍であり, また大気組成は水素 (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ため, 本研究では木星磁場の自転周期 (9 時間 55 分 29 秒) に合わせた System III 座標系を用いた. 以下に木星のパラメータを示す (表 1).

表 1 木星および地球の情報

	木星	地球
赤道半径 (km)	71,992	6,357
質量 (kg)	1.90×10^{27}	5.97×10^{24}
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	0.52	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対流圏の構造はそのまま惑星表面に繋がっており、大気の下限ははっきりしていないが、通常 1bar 付近が木星大気の下限として扱われる。木星対流圏は下から順に H_2O 、 NH_4SH 、 NH_3 の 3 種類の雲が存在する。また雲層より上部の対流圏と成層圏にわたってヘイズが存在する。また木星対流圏と成層圏の境界である対流圏界面は高度 0.1bar 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、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を載せる (図 1)。この図の実線が気圧高度での温度変化を表わす。

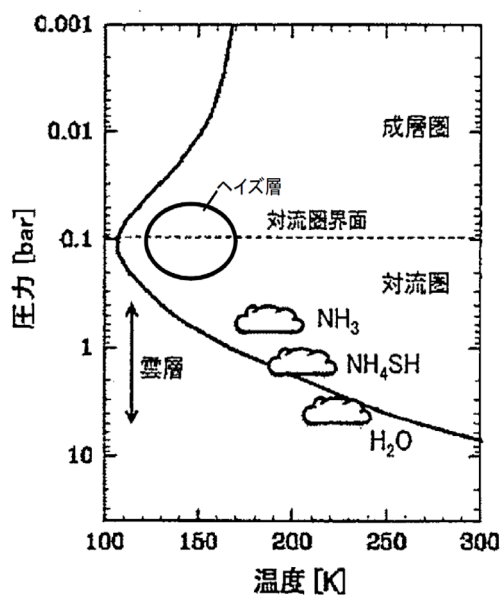


図 1 木星大気の鉛直構造 [杉山 他, 2011]

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帯はゾーン、暗い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° 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維持される。以下に木星南半球の南緯 40 度から 90 度までの風速のプロファイルを示す。図中の実線が各緯度での経度方向の風速を表わす。

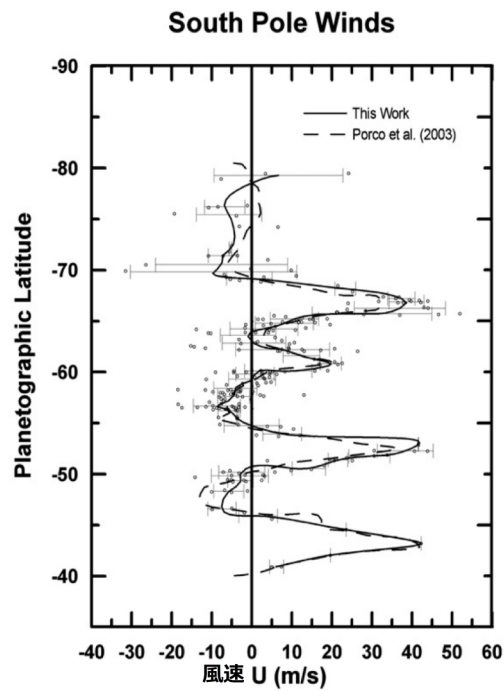
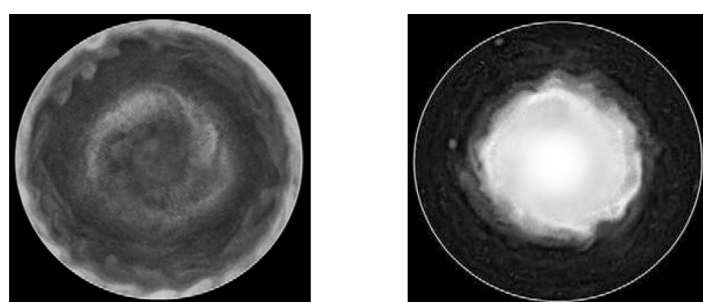


図 2 木星南極域の風速プロファイル [Barrado-Izagirre et al., 2008]

1.2 木星極域ヘイズの先行研究

木星の両極域には成層圏ヘイズが存在しており, 889nm の波長で木星を見たときに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. また紫外波長でもこの構造は観測でき, この場合は 889nm と比較してさらに明るい領域が広がって見える [Barrado-Izagirre et al., 2008].



[1]258nm で撮像された画像 [2]889nm で撮像された画像

図 3 カッシーニで撮像された木星南極域の画像 [Barrado-Izagirre et al., 2008] これらの図はそれぞれ中心が南極点で, 限界緯度を 80 度としている.

このキャップ状の構造の縁は先行研究により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 度で波構造になっていることが判明した. またこれらの観測によって極域ヘイズの経度方向の波動の移動速度と背景風の計測が行われた. さらに観測された年での波構造の位相速度についても計算され, ここでは観測された年によって 2 倍の変動があることが示された [Barrado-Izagirre et al., 2008].

以下に観測内容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 2).

表 2 HST 及びカッシーニ ISS による木星南極域のヘイズ波構造の観測情報 [Barrado-Izagirre et al., 2008]

	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 (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

また観測波長を変えることにより観測できる高度が異なる。先行研究で用いられた波長は、それぞれ 258nm で 100mbar(ヘイズ上層), 750nm で 750mbar(対流圏雲頂), 890nm で 361mbar(ヘイズの波動) の感度高度を持つ。これまでの観測によって波の移動速度は観測を行った年で数倍の変動がみられ、また観測波長のうち 890nm 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 100-750mbar 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ロスビー波だということがここで示唆された [Barrado-Izagirre *et al.*, 2008]。しかしこれまでの観測からは、この波構造の鉛直方向の伝搬の時間変化やより短いタイムスケールでの波構造の水平方向の時間変化などはわかっていない。

1.3 ロスビー波

次にこ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．

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

ここで k, l, m はそれぞれ帯状, 子午, 鉛直方向の波数で, c は波の移動速度, $\bar{u}$ は背景風速度, β_e は帯状平均風速の勾配, N はブランドバイサラ振動数, f はコリオリパラメーターで南緯 67 度では $3.14 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, H はスケールハイトである．

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．

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

ここで β, β_y, β_z はそれぞれ惑星渦度の勾配, 帯状風からの渦度勾配, 鉛直のウインドシアである．ここで第 1 項は $\beta = dj/dy \sim 2.2 \times 10^{-12} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 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．

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

ここで木星南緯 67 度での重力加速度は 26.17 m s^{-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 $R^* = R/\mu$ ($R = 8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$, $\mu = 2.309 \text{ g mol}^{-1}$) である．これにより β_e の第 3 項は南緯 67 度及び 350mbar 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

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

以上求められたパラメータを用いると, ロスビー波の分散の関係式は以下ようになる．

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

ここで l , $\bar{u}$, c , m が変数となり, 波がロスビー波か否かであるかの判断は, 波の移動速度 (c), 背景風速度 ($\bar{u}$), 緯度方向 (l) 及び鉛直方向 (m) の広がりによって決定される [Li et al., 1996].

1.4 本研究の目的

本研究では木星極域における波構造のダイナミクスを明らかにすることを目的とする. 先行研究では極域でみられる波構造はロスビー波とのかかわりが示唆されているが, それを判断するのに必要な波構造の緯度方向と鉛直方向の広がりとは確定していない. 本研究では観測により, 波構造をロスビー波と判断するために必要な観測時の波の移動速度や波構造の緯度方向や鉛直方向の広がりを明らかにする. そのため本研究では惑星観測に特化した北海道大学のピリカ望遠鏡を用いることによって, 木星のメタン吸収波長 (889nm, 727nm 等) のモニタリング観測とメタンバンドスキャンを行い, 上記のパラメーターを得る.

これまでの木星極域の研究はほぼ木星の南極域に限ったものである. 北半球の極域においても南半球と同様にキャップ状の構造がみられるので, 本研究では北極域における極域ヘイズの波動についても述べる. これにより波構造の鉛直方向と緯度方向の広がりの南北両半球の対称性の有無が明らかになると考えられる.

2 観測

本研究では北大ピリカ望遠鏡を用いて木星の観測を行った。観測に用いた望遠鏡の概要については 2.1 節に、観測装置については 2.2 節に、そして観測の概要について 2.3 節に示す。

2.1 北大ピリカ望遠鏡

本研究では北海道大学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 1.6m 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理学研究院附属天文台は北海道名寄市の北緯 44.4° 、東経 142.5° 、高度 151m に位置する。名寄の平均的なシーイングサイズはおよそ $1.3''$ - $2.3''$ 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 4 北大ピリカ望遠鏡

2.2 Multi-Spectral Imager(MSI)

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研究院が開発したスペクトル撮像装置で, 1.6m 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 0.031 s の露光時間で木星の撮像を行った).

以下に MSI の情報についてをまとめる (表 3).

表 3 Multi-Spectral Imager の詳細情報 [Watanabe *et al.*, 2012]

パラメーター	量
波長域	360-1050nm
観測視野 (通常モード)	$3.3' \times 3.3' (0.389''/\text{pixel})$
観測視野 (高解像度モード)	$41'' \times 41'' (0.080''/\text{pixel})$
液晶可変フィルター (VIS)	400-720nm ($\Delta \lambda = 10\text{nm}$)
液晶可変フィルター (SNIR)	650-1100nm ($\Delta \lambda = 10\text{nm}$)
検出素子	512×512 pixel EMCCD



図 5 Multi-Spectral Imager

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, さらに鉛直方向の変化を見積もるために 1 番深いメタンバンドフィルターである 889nm の波長を中心に観測を行った. また木星大気の鉛直方向の構造を調べるために, メタンバンドスキャンとしてメタン吸収波長とその周辺波長の観測も行った. また観測は木星の高度が 20 度以上になる時間が 2 時間以上続く時期に行った. バイアスは観測中およそ 1 時間に 1 回のペースで 1 回につき 10 枚取得をした. フラットは毎日薄明時に天頂付近のスカイに望遠鏡を向けて観測設定ごとに 5 枚ずつ撮像した. 天候不良の場合は代わりにドーム内に取り付けられたフラット板に一樣になるように光源を当てたドームフラットを取得した.

表 4 に本研究に用いた 2011 年から 2013 年にかけてのピリカ望遠鏡で行われた木星観測の概要を示す.

表 4 ピリカ望遠鏡での観測の概要

観測期間	観測波長 (nm)	木星視直径	シーイングサイズ	観測者
2011 年 10 月	727, 750, 830, 850, 889, 950	49.5''	1.6''-2.6''	濱本 昂, 尾崎 彰士
2011 年 11 月	619-945(10 colors)	48.8''	2.3''-4''	濱本 昂
2012 年 8 月	502-945(16 colors)	38.2''	1.4''-1.7''	濱本 昂
2012 年 9 月	502-945(16 colors)	41.5''	2.4''-2.8''	濱本 昂
2013 年 9 月	727, 750, 889	35.6''	2.7''	合田 雄哉
2013 年 10 月	727, 750, 889	39.4''	2.0''-3.1''	合田 雄哉
2013 年 11 月	502-945(16 colors)	42.8''	2.0''-3.0''	合田 雄哉
2013 年 12 月	727, 750, 889	46.2''	2.1''	合田 雄哉

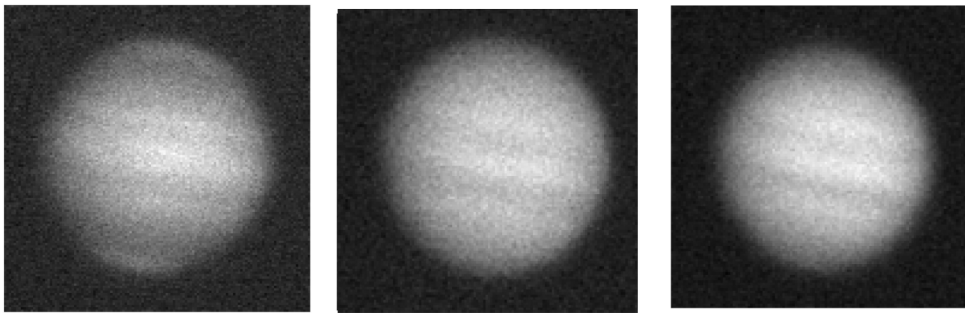


図 6 2013 年 10 月に撮像された木星画像, 左:889nm, 中央:750nm, 右:727nm

3 データ処理及び解析

本研究では画像データの 1 次処理に天文解析ソフトの `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 節に、画像の合成については 3.2 節に、撮像された連続画像の位置の補正については 3.3 節に、サブピクセル画像の作成は 3.4 節に、周辺減光の補正については 3.5 節に、そして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 画像データの 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 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し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。このむらを補正するために一様光源に光を当てた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。本研究ではドーム内のフラット板に均一な光を当てることによりこれを作成した。フラットフレームをバイアス処理を行った天体画像データから割り、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感度むらを補正した天体画像を作製した。

これらの処理は「(木星画像- バイアス画像)/(フラット画像- バイアス画像)」のように計算でき、このようにして計算された画像を各画像内の全ピクセルのカウントの平均値で割ることにより、1 次処理を行った後の画像が作成される。

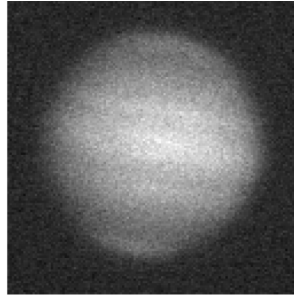
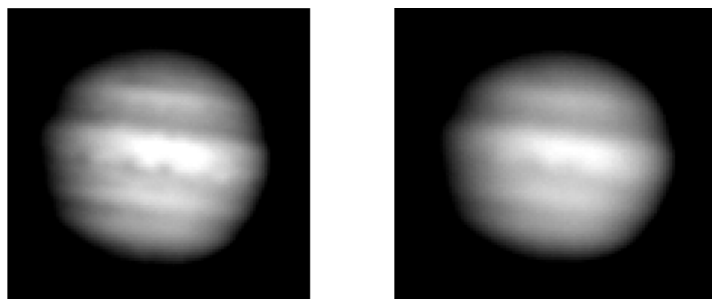


図 7 1 次処理後の画像

3.2 画像の合成

木星のコントラストがはっきりしている画像を重ね合わせるため, まずはコントラストの評価を行った. 木星模様のコントラストの大きさを求める際に, リムの領域を除くため木星画像における地球天頂角が 50° 以下になる領域のピクセルのカウント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することができるので, 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.

図 8 に標準偏差の大きい画像上位 10% を合成したものと下位 10% の画像を合成して得られた画像を示す. これを見ると上位 10% のものが模様のコントラストがはっきりしているのが見える.



[1] コントラスト上位 10% の画像の合成 [2] コントラスト下位 10% の画像の合成

図 8 コントラストにより並べられた画像の合成例

3.3 連続画像の位置補正

ここでは画像データを MATLAB に読み込んで行列に変換したうえで、緯度経度情報を取得するために木星の模擬画像面を作成した。この模擬画像面を作成するために、NASA のウェブページの HORIZONS (<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>) からピリカ望遠鏡での観測日時 of 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、木星の角直径の情報を取得した。

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 9 左)。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 9 木星スリット画像 (左) と模擬木星面 (右)

3.4 サブピクセル画像の作成

木星画像を経度 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. このとき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のようになる.

$$Dst(x, y) = \begin{bmatrix} h(y_1) & h(y_2) & h(y_3) & h(y_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Src(-1, -1) & Src(0, -1) & Src(1, -1) & Src(2, -1) \\ Src(-1, 0) & Src(0, 0) & Src(1, 0) & Src(2, 0) \\ Src(-1, 1) & Src(0, 1) & Src(1, 1) & Src(2, 1) \\ Src(-1, 2) & Src(0, 2) & Src(1, 2) & Src(2, 2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(x_1) \\ h(x_2) \\ h(x_3) \\ h(x_4) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

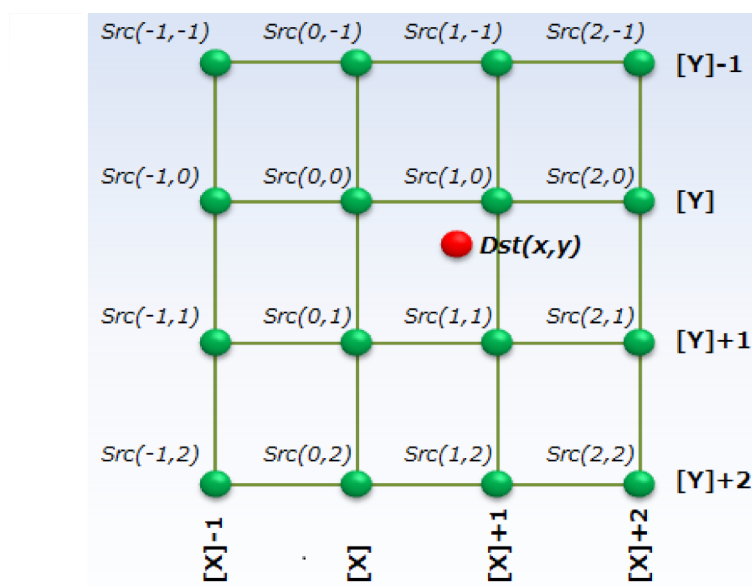


図 10 バイキュービック補間に用いる各プロット

ここで $Dst(x, y)$ は補間によって推定される輝度値を, $Src(i, j)$ 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 3.2, 3.3 のように求める位置から参照する位置の距離をあらわす.

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = 1 + x - [x] \\ x_2 = x - [x] \\ x_3 = [x] + 1 - x \\ x_4 = [x] + 2 - x \end{array} \right. \quad (3.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1 = 1 + y - [y] \\ y_2 = y - [y] \\ y_3 = [y] + 1 - y \\ y_4 = [y] + 2 - y \end{array} \right. \quad (3.3)$$

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, 以下のようにあらわされる.

$$h(t) = \begin{cases} (a+2)|t|^3 - (a+3)|t|^2 + 1 & (|t| \leq 1 \text{ のとき}) \\ a|t|^3 - 5a|t|^2 + 8a|t| - 4a & (1 < |t| \leq 2 \text{ のとき}) \\ 0 & (2 < |t| \text{ のとき}) \end{cases} \quad (3.4)$$

ここで本研究では $a=-1$ とした.

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以上に周辺減光の効果による明暗が大きくなるため、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 11° 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。ある画像の経度プロファイルはこの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 11 にその周辺減光曲線を示す。

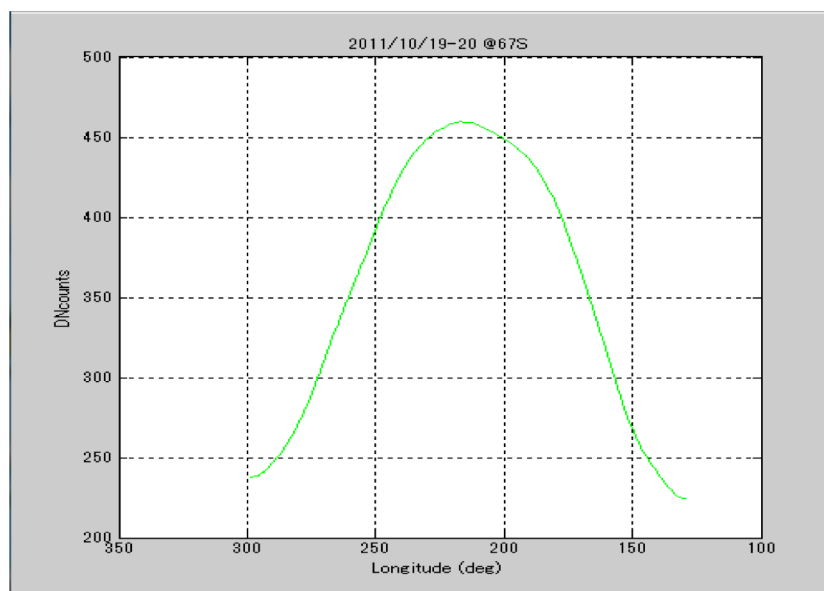


図 11 作成した周辺減光曲線

3.6 木星経度プロファイルの作成

木星極域存在する経度方向に広がる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。今回は各撮像された画像から観測中心経度 $\pm 30^\circ$ の領域のみを使用して各画像の経度を合わせたうえで画像を重ね、経度方向に3度ごとの範囲にある輝度の値の平均を求めることで経度プロファイルを作成した。

図12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。またエラーバーは経度 3° ごとの領域での輝度の標準偏差を示している。

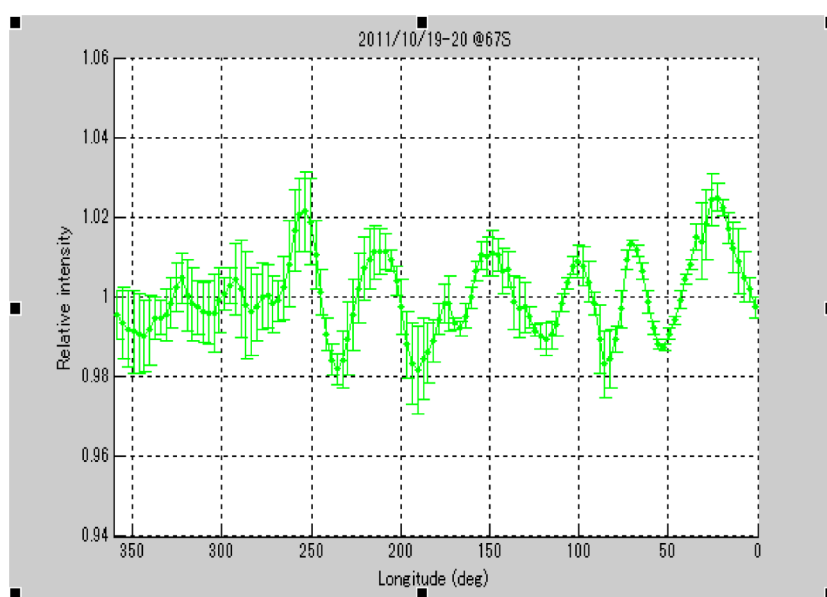


図12 作成した経度プロファイル

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 から 17 日, 10 月 29 から 31 日, 11 月 16 から 17 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．

4.1 波構造の時間変化

2011 年における南緯 67 度付近でみられる波構造の時間変化を見積もるために, 889nm で観測された 2011 年の 10 月 19 から 20 日, 10 月 29 から 31 日, 11 月 16 から 17 日の波構造の経度プロファイルを示す．図 13 の上のグラフが実際のプロファイルで, 下のグラフは 1 点をプロットするために用いたデータ数である．

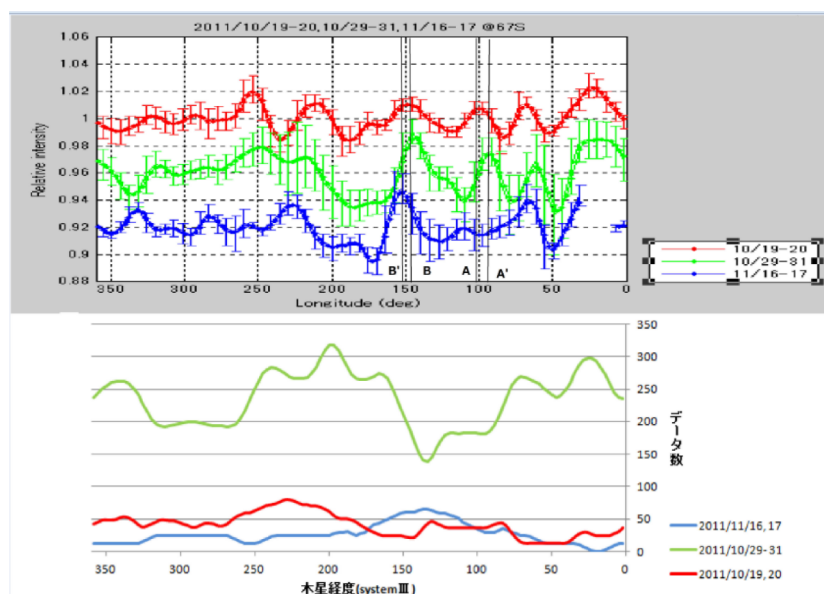


図 13 経度プロファイルの時間変化 (上) とプロットに用いたデータ数 (下)．それぞれ赤線が 10 月 19 から 20 日, 緑線が 10 月 29 から 31 日, 青線が 11 月 16 から 17 日を示す．

図 13 の上の黒線は波構造の山の位置を示している．A は 10 月 16, 17 日の波の山, A' は 10 月 29-31 日の波の山を示す．また B は 10 月 29-31 日の波の山, B' は 11 月 16, 17 日の波の山を示す．それぞれ A と A', B と B' が同一の波の山を示していると考えられる．

4.2 南北両極域での波構造の違い

木星の南及び北半球における緯度による波構造の変化をみるために以下のような経度方向に伝搬する波のプロファイルを作成した。データは2011年10月16から17日のもので観測波長は889nm, 両半球ともに緯度77° から47° までを5° 刻みに波のプロファイルを作成した(図14)。この図は上から北半球の緯度77から47度, 南半球の緯度47度から77度を示す。

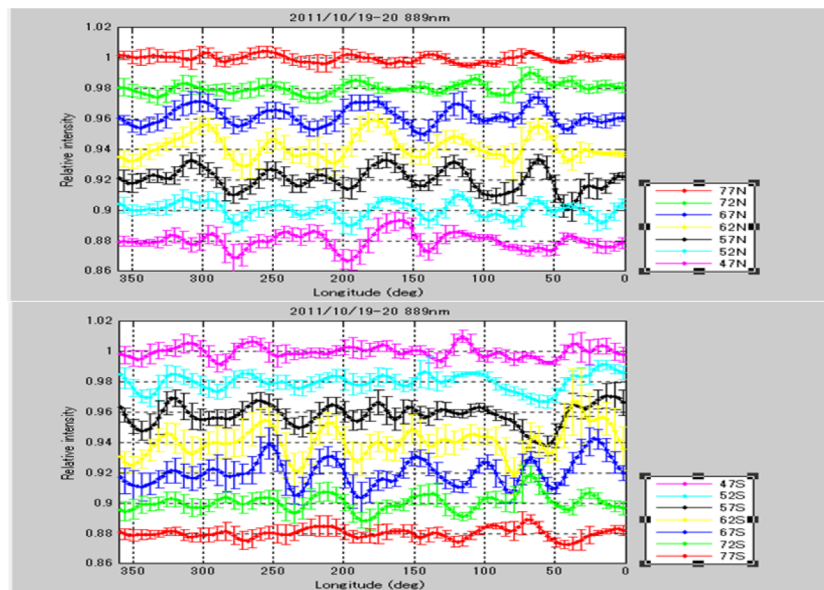


図14 南北両半球における各緯度ごとでの波構造の経度プロファイル

これを見ると波の緯度方向の広がりには南北非対称で、特に北半球の場合は北緯60から70° でみられた波が47° まで波の形状が維持されていることがわかる。南半球の場合は47° 付近は波の振幅が北半球に比べて小さく、波の形状も南緯67度付近とは異なる点が多いことが示される。

次に北半球でこの波構造がどこまでみられるのかを調べるために、北半球のみの 77° から 2° まですに範囲を変えた経度プロファイルを作成した (図 15). この図は上から北緯 77 度から北緯 2 度までを 5 度ごとに示す.

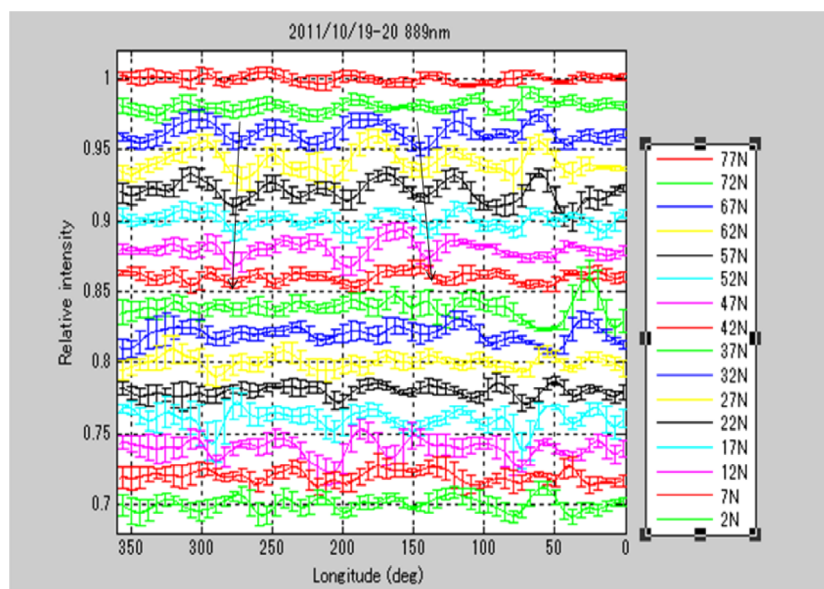


図 15 北半球における各緯度ごとでの波構造の経度プロファイル

この図から北緯 67 度で見られる波形の山と谷の多くが、北緯 42 度付近まではほぼ同じ経度に見られることが示される.

4.3 木星の鉛直方向の波構造の広がり

波構造の鉛直方向の広がりを調べるために,異なる観測波長での波構造の経度プロファイルを作成した.図 16 は 2011 年 10 月 19 から 20 日の木星の南緯 67 度を 890nm から 950nm まで観測波長を 3nm ずつ変えながら波の経度プロファイルを示したものである.同様にして南北の非対称性を比較するために,北緯 67 度の異なる波長で観測された波構造の経度プロファイルも作成した(図 17).

これらの図から 890nm での波の振幅,波の山と谷の存在する経度が南北 67 度で大きく異なることが示される.また異なる波長間で波構造を比較すると,南半球の場合は 890nm から長波長になるにつれ波の振幅が小さくなり,北半球では 890nm から 941nm までは長波長になるにつれ波の振幅が大きくなるという波の振幅の変化にも南北間で違いがみられる.

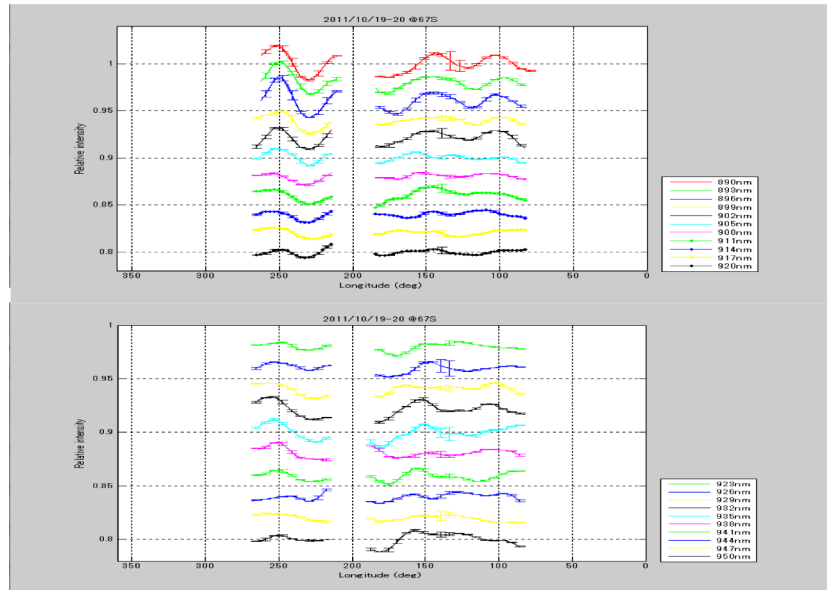


図 16 67S における鉛直方向の波構造の経度プロファイルの変化

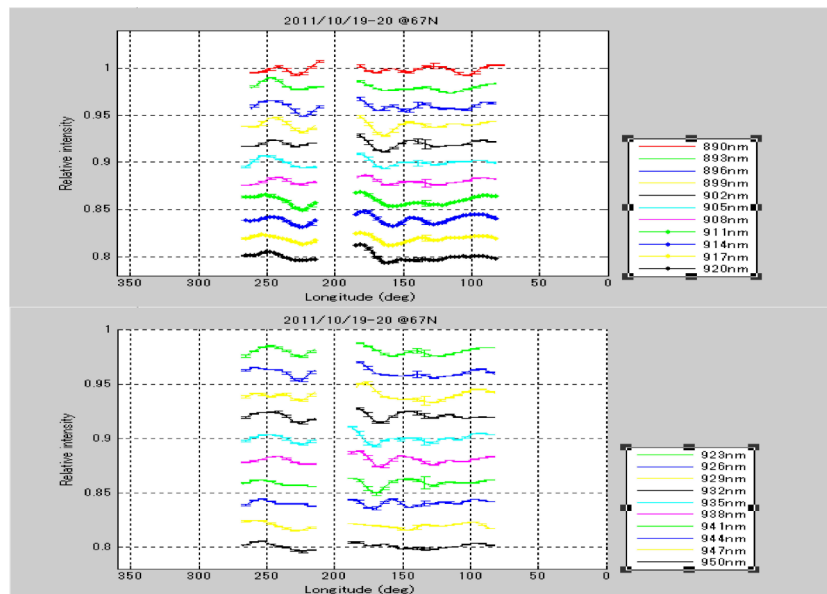


図 17 67N における鉛直方向の波構造の経度プロファイルの変化

さらに 4.2 節で北半球では南半球に比べてより低緯度まで北緯 60- 70 度付近の波形がみられているので、北緯 42 度における波構造の経度プロファイルも作成した (図 18). このグラフも図 16, 17 と同様に上から 890- 950nm の波長を 3nm 間隔で経度プロファイルを作成したものである.

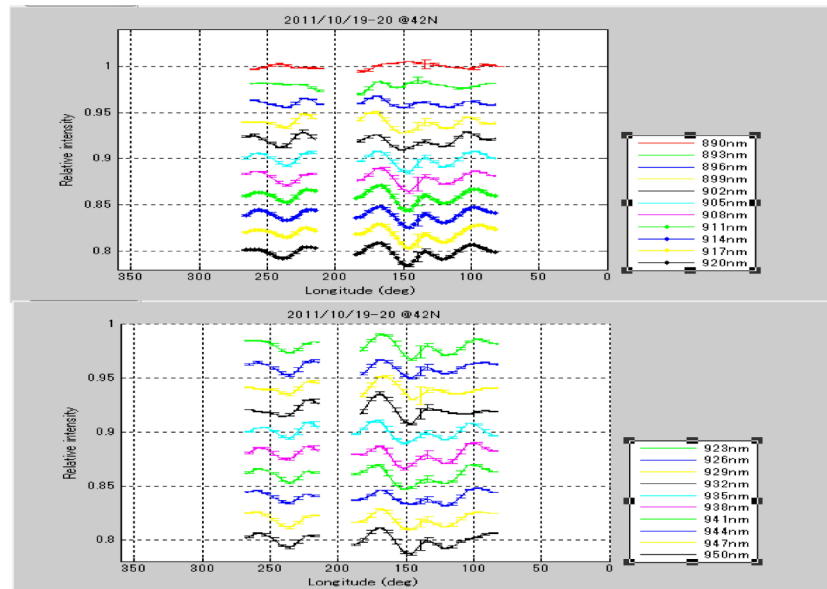


図 18 42N における鉛直方向の波構造の経度プロファイルの変化

図 18 から北緯 42 度では 899nm より長波長のグラフの波の振幅が大きく、また波の山と谷の存在する経度が 899- 950nm でほぼ一致していることが示される.

5 議論

まず 4.1 節の結果から, 2011 年の波構造の伝搬についてを見積もることができた. 図中の黒線は波の山のピークではあるが, A_1 と A_2 , B_1 と B_2 がそれぞれ同一の波の山が伝搬しているものとする, 波の速度はそれぞれ約 2m/s 及び約 -1m/s と見積もることができる. これは先行研究で示された波の伝搬速度の範囲 (10 ± 4 から $0 \pm 4\text{m/s}$) に収まっている. ただし波構造は全く同じ形で維持されているのではなく, 特に経度 200 度以上の場所においては波形が 2 週間ほどで大きく変わっている.

また 4.2 節の結果から, 波構造の緯度方向の広がりには波の形状をみると南半球と北半球で非対称だということが示された. グラフから北緯 $62, 67$ 度でみられた経度 140 度及び 270 度の波構造の谷はほぼ同じ経度で北緯 42 度付近まで見られる. また, 南半球のほうは南緯 47 度では南緯 $62, 67$ 度付近と似たような波形になっている経度もあるが, 北半球ほどそれが顕著ではない. ここで波構造の緯度方向の解像度を考慮すると 2011 年 10 月 19-20 日の木星視直径は 49.5 秒角, 観測場所でのシーイングサイズは 1 番悪い時で 2.6 秒角より緯度 60 付近ではおよそ緯度方向は 13 度分, 緯度 40 度付近では 8 度分の範囲は誤差となるため, 図の波構造は南北 1, 2 本分の波の影響を受ける可能性があると考えられる. これを考慮した場合でも特に北半球の方が南半球に比べてより低緯度まで同じような波が続く, 緯度方向により広い範囲で緯度 67° 帯と同様の波形を持つ波がみられると言える.

4.3 節の結果からは, 890nm でみられた波の形状が高度が下がるにつれ波形が変化していることがわかる. 図 19 に木星スペクトルの図を示すが, 今回解析を行った波長は 890- 950nm で, この範囲ではメタンの吸収量が観測波長が長くなるにつれ小さくなっている. これにより 890nm から波長を長くするほどより木星の低高度を見ているということが示される.

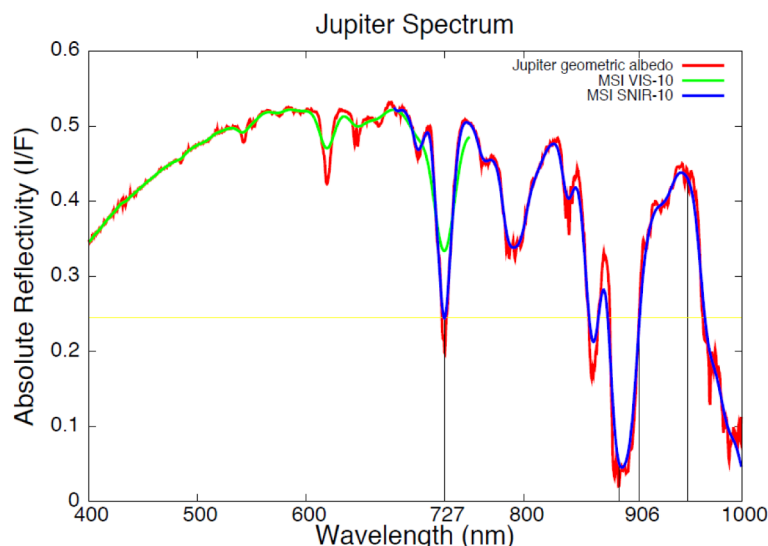


図 19 木星のスペクトル [Karkoschka., 1994]

南北 67 度のグラフを見ると, この波形の変化の仕方は南北の緯度 67 度ではともに 890nm でみたときの波の振幅が大きく異なっていて, 北半球が南半球よりも振幅が小さい. これにより北半球では明暗のコントラストが南半球ほどはっきり出ていないことがわかる. また 4.2 節で明らかになった北緯 62, 67 度で見られる波構造の南限近くとされる北緯 42 度の波構造の鉛直方向の経度プロファイルを見ると, より低高度を見ている 950nm 付近の波の振幅が 890nm と比べて大きいということが明らかになった. また 889nm から 950nm までほぼ同じような波形がみられる. 特にこの北緯 40-50 度付近の緯度帯では雷の活動が活発ということが知られていて, 下層で見られる波動がより高高度に向かって広がっている可能性が示唆される. 4.2 節の緯度ごとの経度プロファイルの南北の非対称性も, この北半球でのみ見られる雷活動が影響しているものと考えられる.

6 まとめと今後の展望

カッシーニ及びハッブル宇宙望遠鏡による観測によって、木星両極域を 890nm の波長で見るとキャップ状の構造をしており、その構造の縁が波構造をしていることがわかった。しかしこれら探査機や宇宙望遠鏡による観測は惑星観測のために長期的に継続してマシンタイムを確保することは容易ではなく、短期での時間変動を見る場合は別の手段を用いる必要がある。そこで我々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することにより、短時間で波長を切り替えながらの観測を行い木星極域の観測を 2011 年から 2013 年にかけて行った。

その結果 2011 年 10, 11 月の木星の波構造の動きの速度、木星の南北 67 度を 889nm でみたときの波構造の緯度方向の広がり、またこの波構造の鉛直方向の変化などを見ることができた。また南北の波構造の緯度方向の広がりの非対称性が確認された。しかしロスビー波を判断するのに必要な観測時期の背景風の計測は行われておらず、今後木星表面で見られる模様の移動など用いて計測を行う必要がある。

今後は 2011 年以来行われていないメタンバンドスキャンも含めて、889nm をはじめとする主要波長でのモニタリング観測を継続して行っていく。これにより特に鉛直方向の 890nm で見られる波構造の鉛直方向の波形の広がりがわかり、これを波構造の移動速度や緯度方向の波の広がりとは照らし合わせていくことで、この波がロスビー波かどうかを判断していく。また 2012, 2013 年の観測データを用いて 2011 年と同様に上記のパラメーターを求めていき、時間変動を見積もる。これらにより木星極域における波構造の時間変化を求め、将来的な木星極域のダイナミクスの解明につなげていく。

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発表に対する姿勢などサイエンスを追求する上で大切なことをお教え頂きました。渡邊誠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をゼミを通じて教えて頂きました。また渡部重十教授や佐藤光輝講師をはじめとする惑星宇宙グループの探査観測ユニットのスタッフの方々には、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。また先行研究でピリカ望遠鏡を用いて観測を行ってい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士先輩には、私が本研究を始める以前からのピリカ望遠鏡からの木星画像データを頂き、特に濱本先輩には直接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。さらに今井正亮先輩をはじめとして、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、観測を通じて大変お世話になりました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 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.
- [2] NASA/HORIZONS (<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>)
- [3] 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
- [4] 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.
- [5] Sanchez-Lavega, A., and R. Hueso.,1998. A system of circumpolar waves in Jupiter's stratosphere, *Geophysical Research Letters*, 25, 4043-4046.
- [6] 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.
- [7] 尾崎彰士 (2012) 北大ピリカ望遠鏡による木星極域ヘイズの観測
- [8] 木村竜治 (2004) 地球流体力学入門
- [9] 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
- [10] 濱本昂 (2013) スペクトル撮像観測による木星及び土星大気の研究