

望遠鏡を用いた天王星大気の輸送速度推定に関する研究

学籍番号 20233060

天田 耕太郎

指導教員 高木 聖子 講師

## 概要

天王星は公転面に対し自転軸が  $98^\circ$  傾いた状態で公転する惑星である。これまでの接近観測は 1986 年に実施されたボイジャー2号(NASA)によるフライバイ観測のみであり、その後は地上望遠鏡・宇宙望遠鏡により観測が続けられている。2007年の春分点通過後、2014年から  $\text{CH}_4$  沈降に起因する北極域における極冠が観察されている [Toledo et al., 2019]。また、H-band( $1.6 \mu\text{m}$ )における観測では、他の領域よりも明るい局所雲が確認されている [Sromovsky et al., 2015]。

ハッブル望遠鏡(HST)により観測された雲頂模様をトラッキングすることにより、帯状風の最高速度は南北  $60^\circ$  付近でそれぞれ約  $220 \text{ m/s}$  と推定されている [Soyuer et al., 2022]。この帯状風は、深部において天王星磁場および惑星間磁場との相互作用が示唆されているが、観測不足故にその理解は停滞している [Soyuer et al., 2022]。天王星大気の輸送機構をより詳細に理解するためには、局所雲の移動速度変化をこれまでより詳細に知る必要がある。これには、数日-1ヶ月程度の継続観測が必須である。

北海道大学大学院理学研究院附属天文台は北海道名寄市にあり、地上望遠鏡(ピリカ望遠鏡)を所有している。主鏡口径は  $1.6 \text{ m}$  であり、その大きさは太陽系内天体観測用の望遠鏡としては世界最大級である。本研究では、ピリカ望遠鏡に搭載されたスペクトル撮像装置 MSI [Watanabe et al., 2012]を用いて、2022年から2024年にかけて数十夜の多波長撮像観測を行った。

2022年9月から2023年2月の観測(2023年 天田卒業論文)では、MSIで波長域  $530 - 760 \text{ nm}$  における撮像観測を行い、 $\text{NH}_3$ 吸収波長  $552 \text{ nm}$  と  $\text{CH}_4$ 吸収波長  $619 \text{ nm}$  における吸収量の時間変動と天王星の周期より輸送速度を推定した。この結果、 $\text{CH}_4$ 吸収波長では[Soyuer et al., 2022]と同程度の速度が推定され、 $\text{NH}_3$ 吸収波長においては速い速度が推定された。

2023年7月以降の観測では、天王星に対流圏における局所雲を検出し、その移動速度から大気の鉛直・水平方向における移動速度を推定することを目的とした。このため、MSIの高速撮像モードを使用し、従来よりも空間分解能・波長分解能を上げた観測を行った。解析過程では、局所雲の移動に伴う各波長の輝度変化を数値計算し、各観測画像における極冠・局所雲の検出について評価した。

本論文では、MSI観測結果とシミュレーションの作成過程、そして両者の比較を行い、2023年7月から2024年12月の観測結果における局所雲位置の推定の結果を提示する。また、2022年9月から2023年3月の観測結果より導出された帯状風速度との比較を行った上で、今後の展望について議論を行う。

# 目次

第1章 研究背景と目的	3
1-1 天王星の四季	3
1-2 対流圏大気の鉛直・水平構造	5
1-2-1 鉛直構造	5
1-2-2 水平構造	6
1-3 先行研究で見られている特徴	8
1-3-1 極冠	8
1-3-2 局所雲	10
1-4 本研究の目的	11
第2章 観測	12
2-1 観測装置	13
2-2 観測方法	14
2-3 実際の観測	16
第3章 解析	18
3-1 一次処理	18
3-2 フレーム選定・測光	19
3-3 星像模擬画像導出	21
第4章 結果	24
4-1 撮像観測	24
4-2 模擬画像	28
第5章 考察	30
5-1 測光結果の妥当性	30
5-1-1 地球大気の影響	30
5-1-2 星像中心の決定について	32
5-2 模擬画像の妥当性	34
第6章 まとめ	35
謝辞	36
参考文献	37

# 第1章 研究背景と目的

## 1-1 天王星の四季

太陽系第7番惑星である天王星は、軌道長半径が約19 au、公転周期が約84年のガス惑星(天王星型惑星)である。地球の約4倍の半径、約15倍の質量を持ち、大気は $\text{H}_2$ (83.0%),  $\text{He}$ (15.0%),  $\text{CH}_4$ (1.5%), その他分子(0.5%)で構成されている。ガス惑星のため岩石表層は存在せず、対流圏界面の気圧は0.1 barである。

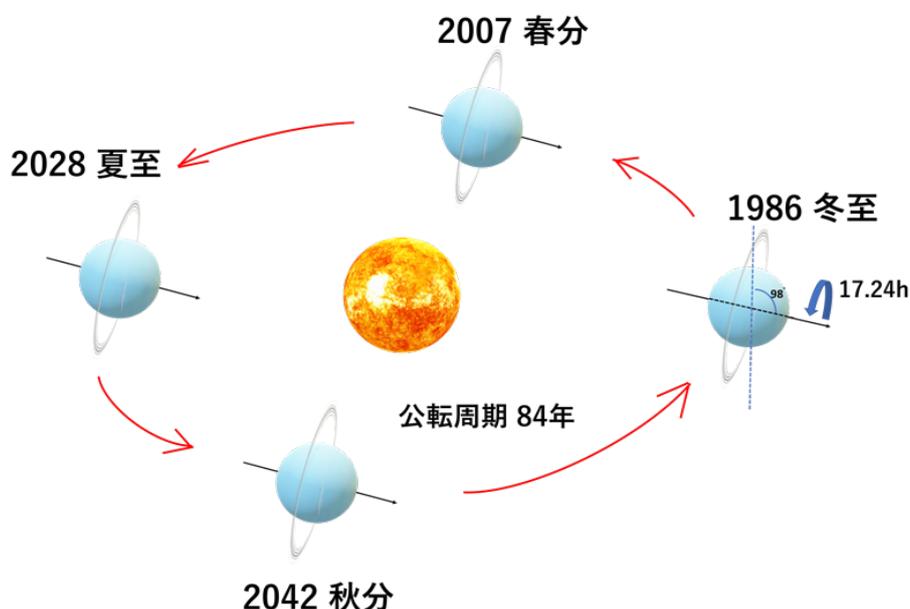


Fig. 1 天王星の自転・公転の概略図

公転面に対し自転軸は常に $98^\circ$ 傾斜した状態で(Fig. 1)、84年と長時間な公転周期に対し、1986年に実施されたボイジャー2号(NASA)の重力場測定から推定される自転周期は17.24時間と地球よりも短時間である。このような特徴を持つことから、各緯度により、太陽フラックスの季節変化が激しい惑星である(Fig. 2)。

1986年から1987年に実施されたボイジャー2号による恒星掩蔽観測から、100 barより上層における $\text{H}^+$ ,  $\text{H}_2$ とその他炭化水素分子の分布、温度分布、水平風速分布が推定された[Allison et al., 1991; Lunie et al., 1993]。また、地上望遠鏡による観測や放射伝達モデルによるシミュレーションにより、約1000 barまでの大気構造・温度構造、風速等が推定されている(Fig. 3)。

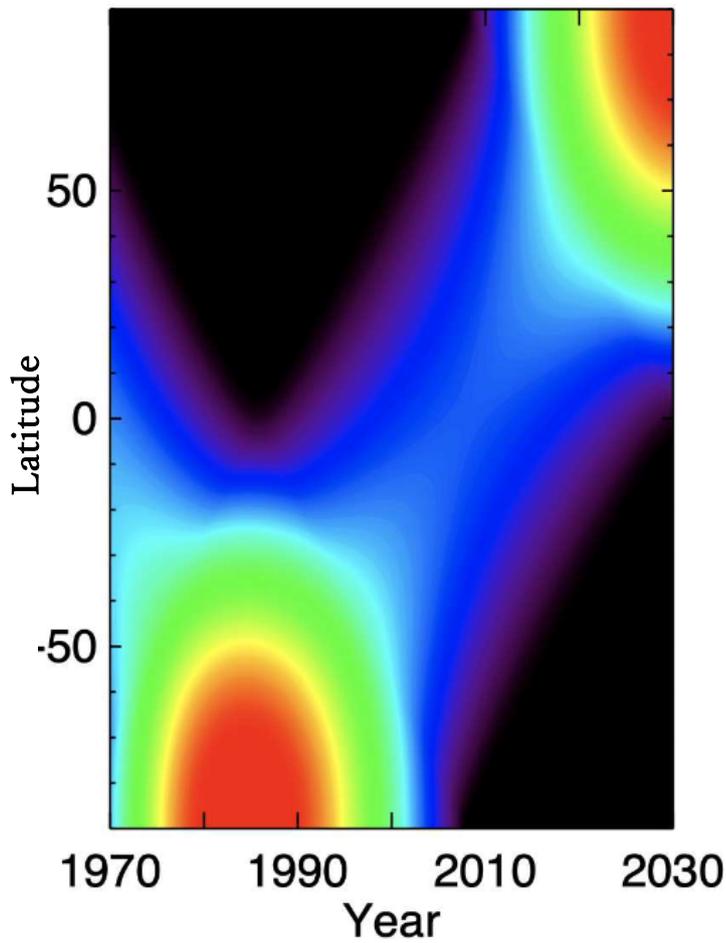


Fig. 2 天王星の各緯度における太陽放射フラックスの経年変化 [Simon et al., 2022]

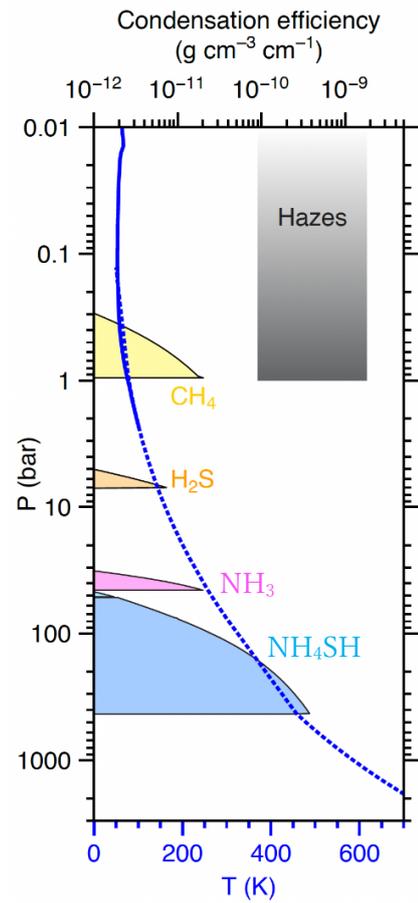


Fig. 3 深度ごとの大気成分による雲層分布(各色領域)・温度分布 [Simon et al., 2022]

## 1-2 対流圏大気の鉛直・水平構造

### 1-2-1 鉛直構造

大気圧力が 0.1 bar 以上となる高度が対流圏界面となっており、1960 年以降の分光観測により、0.1-5.0 bar の領域では  $\text{CH}_4$  とその他の炭化水素により構成されるヘイズ、1.5-10 bar の領域では  $\text{H}_2\text{S}$ 、さらにそれよりも高圧力の領域では  $\text{NH}_4\text{SH}$  の雲層が存在することが判明している (Fig. 3)。また、各雲層に鉛直方向の対流構造が存在すると考えられている (Fig. 4)。

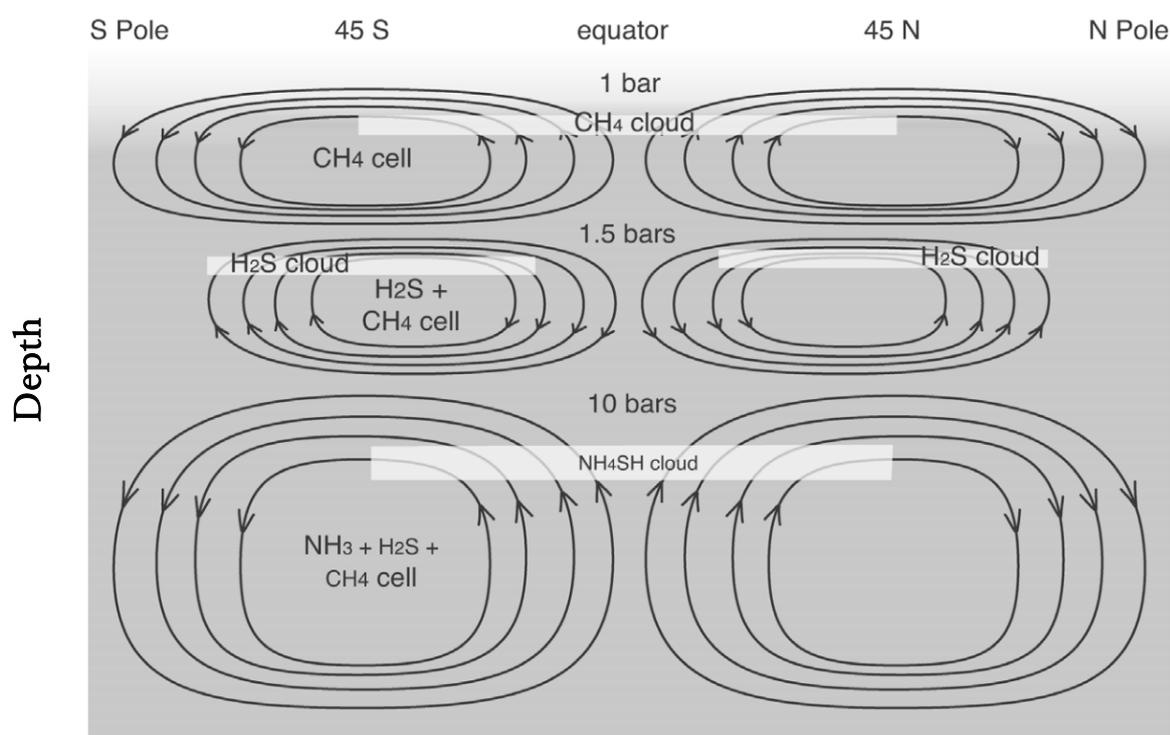


Fig. 4 天王星対流圏(100 bar まで)大気循環の概略図  
[Sromovsky et al., 2024]

## 1-2-2 水平構造

天王星大気では、経度方向に吹く帯状風が卓越しており、ボイジャー2号やハッブル宇宙望遠鏡(HST)により観測された雲頂模様のトラッキングを行うことにより、西向きに最大で 220 m/s 程度の風速であると推定されている[Soyuer et al., 2022]。

Fig. 5 に示すように、帯状風の風速は緯度によって大きく異なり、北緯 60° 付近で最速である。風速は余緯度( $90 - \text{緯度}\theta$ )を用いて Eq. 1 のように推定される。

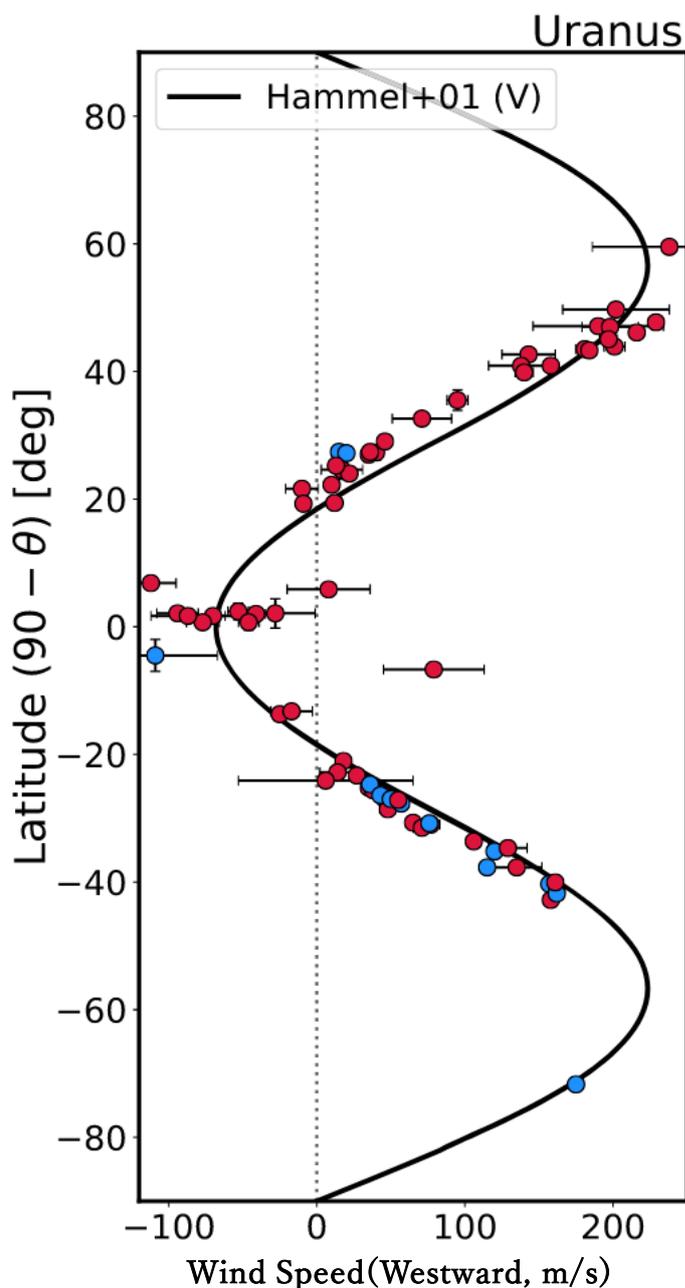


Fig. 5 天王星表面における帯状風分布。青丸はボイジャー2号、赤丸はハッブル宇宙望遠鏡・ケック望遠鏡による観測 [Soyuer et al., 2022]

$$v(\theta)=170 \times (0.6 \sin\theta + \sin 3\theta) \text{ (Eq. 1)}$$

また、Fig. 5 に示すように、 $60^\circ$  以北・ $50^\circ$  以南の高緯度領域における帯状風速度の計測は殆ど行われていない。この領域では、次項で説明する極冠が形成されており、大気成分の南北循環の傾向が低緯度領域とは異なる可能性が高い [Hammel and Lockwood, 2007]。また、帯状風の計測は基本的に雲頂における特徴を数時間追跡するものであるため、各緯度における帯状風の時間変化 (Fig. 5 赤プロットのエラーバー) については詳しく観測・議論されていない。

## 1-3 先行研究で見られている特徴

### 1-3-1 極冠

極冠とは、北極から北緯 70° の範囲まで広がる高反射率の領域である。Toledo et al. (2018)では放射伝達モデル NEMESIS を用いて、1.6  $\mu\text{m}$  の反射率から極冠における  $\text{CH}_4$  の体積混合率分布を推定している (Fig. 6)。その結果、極冠は  $\text{CH}_4$  が 1 bar 以上の低高度領域に沈降し、広範囲で  $\text{CH}_4$  粒子が凝結することにより形成されたと結論づけられている。

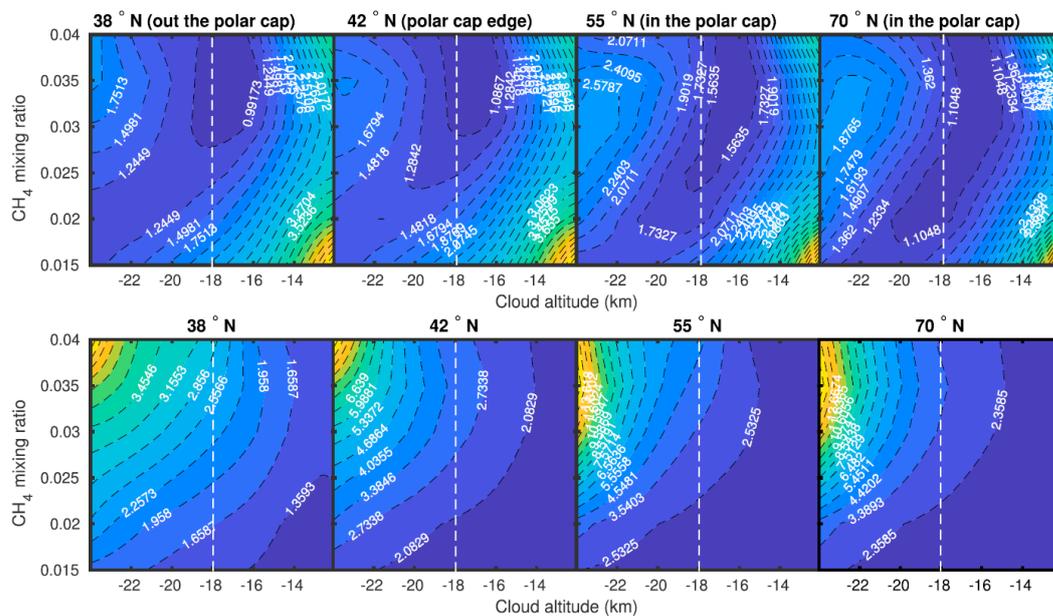


Fig. 6 極冠形成時の各経度における  $\text{CH}_4$  体積混合率(上)と不透明度(下) [Toledo et al., 2018]

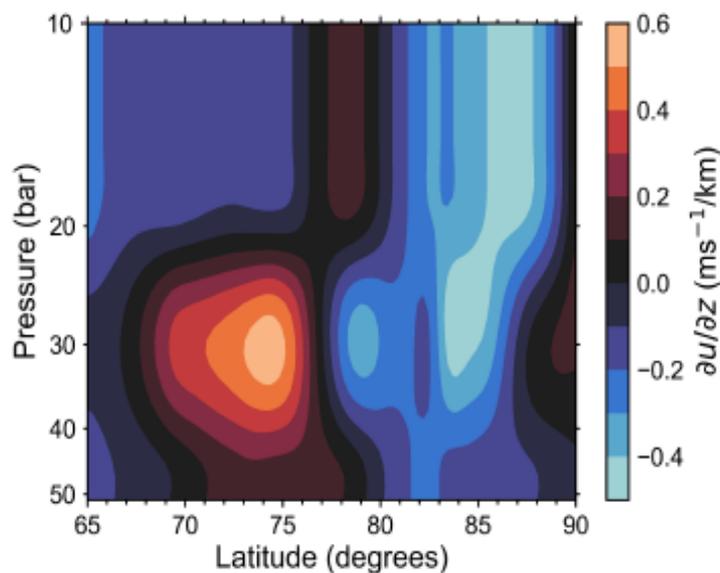


Fig. 7 北緯 65-90° における風速の鉛直シアの分布 [Akins et al., 2023]

また、Akins et al. (2023)では、2015-2021 年において Very Large Telescope(VLT)により測定された波長 1 cm の反射率変化より、圧力 10-50 bar の領域における風速分布を推定しており、北緯 70-80°、20 bar 以下の領域における風速の南北剪断の存在を示唆している (Fig. 7)。

極冠領域の反射率の経年変化は、CH<sub>4</sub> 吸収波長である 727, 889 nm でも 2015-2021 年で観測されており (Fig. 8)、1-5 bar の高度領域におけるエアロゾルの層の厚み変化や全球における CH<sub>4</sub> 循環が衰退の原因であると考えられている [James et al., 2023]。

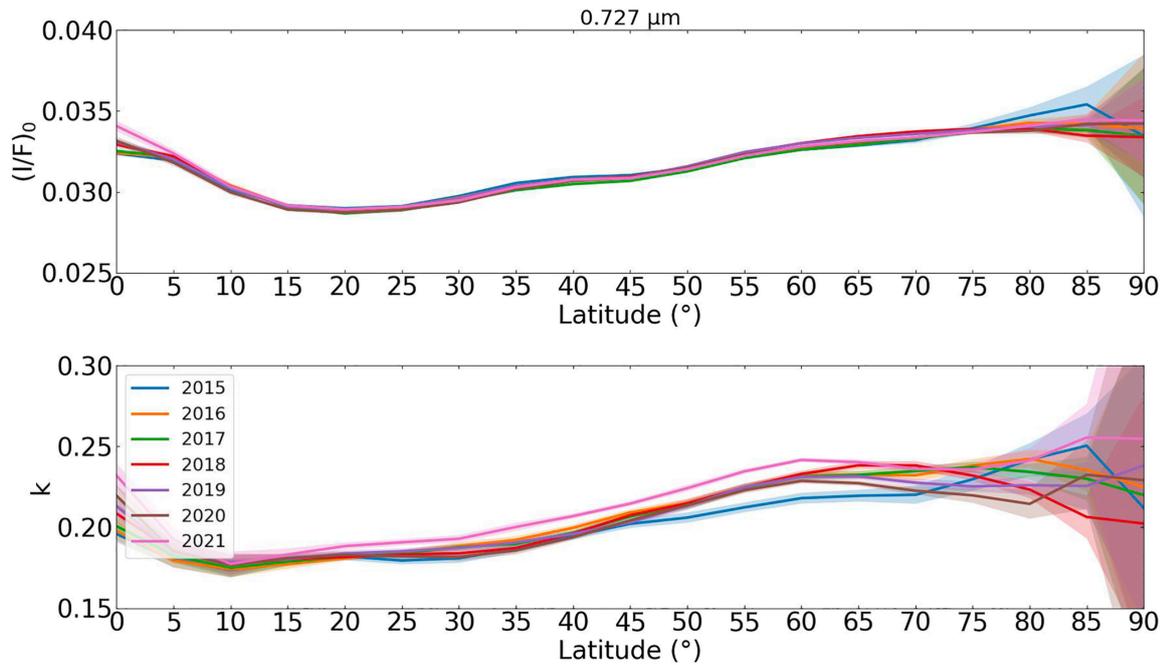


Fig. 8 極冠におけるアルベド(上) とリムダークニングパラメータ  $k$  (下) の変化 (2015-2021 年) [James et al., 2023]

### 1-3-2 局所雲

局所雲とは、他領域よりも大きな輝度を持つ領域である。600 nm 以上の CH<sub>4</sub> 吸収波長で観測でき、2014 年には 2.2  $\mu\text{m}$  の CH<sub>4</sub> 吸収波長において、他の領域よりも最大で 30 % 程度大きな輝度を持った局所雲が記録された (Fig. 9)。この最も明るい局所雲は 0.3-0.7 bar の高度領域に分布しており、その大きさは経度方向に約 25°、最大で約 10000 km 程度であると推定されている [Pater et al., 2015]。

Pater et al. (2015) では、天王星対流圏の中で局所的に CH<sub>4</sub> が集積し、ある程度の圧力となる領域で凝縮することにより局所雲が形成されると考えられている。地球における雲と同様に、天王星の局所雲はその領域における対流活動の動向を示す重要な目印であると言える。しかし、特定の局所雲を 1 週間-数ヶ月の比較的短期間で追跡した研究はこれまでになく、局所雲の移動速度が変化するものなのか未解明である。従って、天王星の対流圏気象の詳細な理解は停滞している。

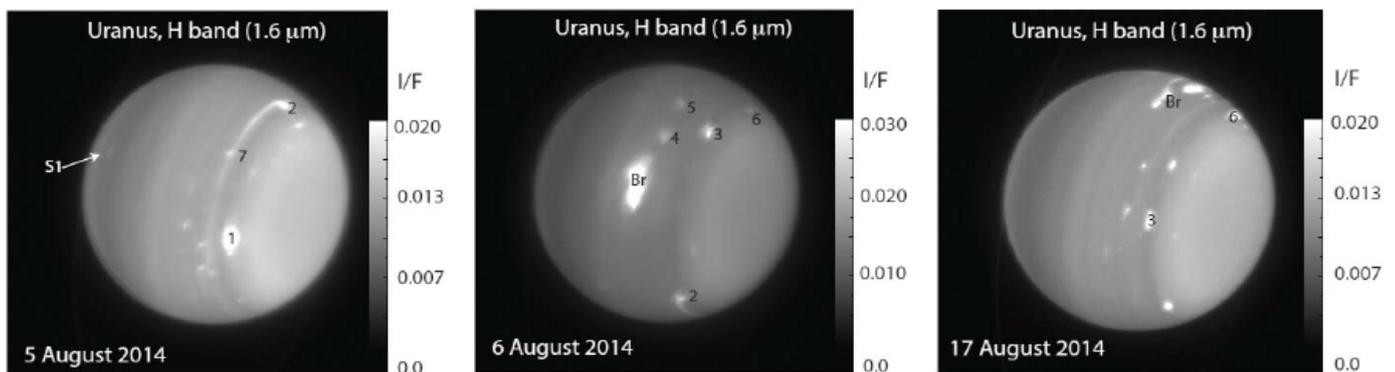


Fig. 9 ハッブル宇宙望遠鏡により 1.6  $\mu\text{m}$  で撮像された局所雲 [Pater et al., 2015]

## 1-4 本研究の目的

天王星大気の 0.1-1.0 bar における局所雲・極冠等の構造は、天王星下部成層圏および上部対流圏における大気循環の状況を如実に反映している。特に、2007 年の春分点以降盛んに観測されるようになった局所雲・極冠は対流構造の変化を反映するものであり、継続的な観測によりその動向を注視することが天王星大気に対するより詳細な理解に重要である。

2022 年に発表された NASA の 10 年計画では、2030 年代打ち上げを目標として天王星を対象とした探査機プロジェクトが発案されている。このプロジェクトでは、天王星大気の鉛直・水平的な成分構造・温度構造等を詳細に調査するため、探査機による周回探査と投下型プローブによる観測が検討されている。接近観測装置の開発には観測環境の推定が不可欠であり、様々な時間スケールの観測がその質を担保するものである。

以上のような背景がありながらも、2025 年現在までに極冠と局所雲を検知できる程度の大型望遠鏡では、マシンタイム確保の難易度から特定の局所雲に対する 1 週間-1 ヶ月程度のスパンでの追跡が十分に行われていない状況にある。このため、このような時間スケールでの局所雲の移動速度の時間変化の推定は行われていない。

本研究は、1 週間-3 ヶ月という比較的短い期間における天王星局所雲の移動速度を、地上望遠鏡観測を用いて推定し、その妥当性を評価する手法を確立することを目的とする。

## 第2章 観測

可視波長観測により局所雲の特徴を追跡するにあたり、観測波長を決定する必要がある。本研究では、観測波長の条件を、0.1-10 barの高度におけるコントラストが観察できる  $\text{CH}_4$  吸収波長であり、尚且つ極冠を検出できる波長であることを条件とした。

Fig. 10 では、Sromovsky et al. (2019)で示された  $\text{CH}_4$  を考慮した光学的深さを示している。Fig. 11 では、James et al. (2023)で提示されたハッブル宇宙望遠鏡のナローバンドフィルタにおける天王星の撮像画像である。この結果より、極冠のコントラストが最もはっきりと見える波長が 619 nm の  $\text{CH}_4$  であると仮定し、この波長の周辺 600-642 nm を観測波長とした。

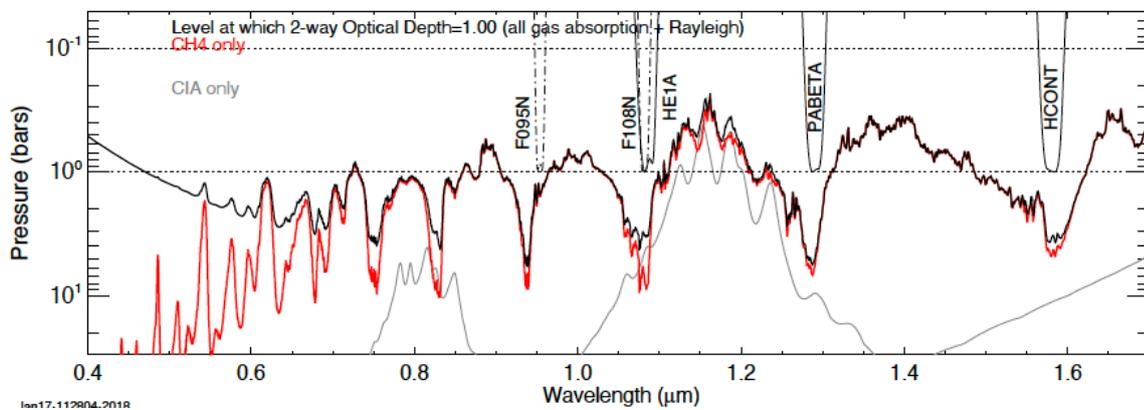


Fig. 10 全ての気体 (黒)と  $\text{CH}_4$  のみを考慮した光学的深さ [Sromovsky et al., 2019]

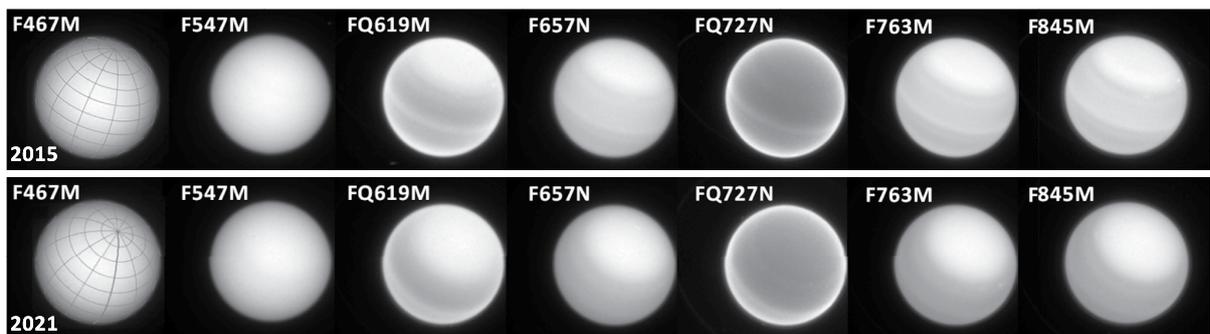


Fig. 11 HST によるナローバンドフィルタによる撮像 2015(上)と 2021(下)  
[James et al., 2023]

## 2-1 観測装置

観測は全て北海道大学大学院理学研究院附属天文台に設置された「ピリカ望遠鏡」(Fig. 12, Table 1)を使用した。ピリカ望遠鏡は太陽系天体の観測を主目的に 2010 年 12 月に設置された。望遠鏡には 1 つのカセグレン焦点と 2 つのナスミス焦点が存在し、それぞれの焦点に観測装置を設置することが可能である。

本研究では、カセグレン焦点の 1 つに設置された可視光マルチスペクトル撮像観測装置 MSI(Multi Spectral Imager)[Watanabe et al., 2012]を使用した。

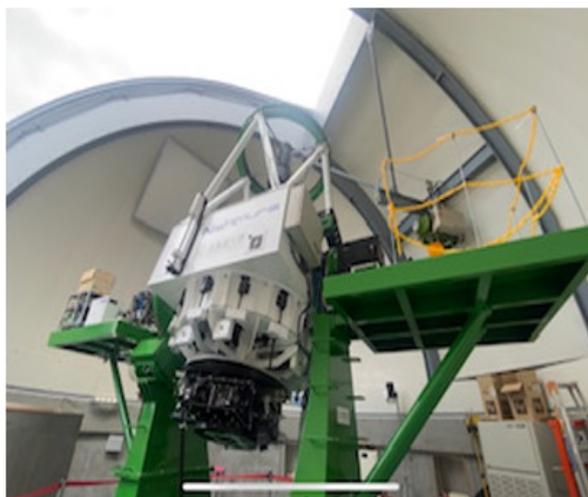


Fig. 12 ピリカ望遠鏡

Table 1 ピリカ望遠鏡の仕様

座標(緯度・経度)	44.4° N 142.5° E (理学研究院附属天文台)
光学系	リッチークレチアン式望遠鏡
焦点	カセグレン焦点×1, ナスミス焦点×2
有効径	1.6 m
焦点距離	19,238 mm

## 2-2 観測方法

撮像装置である MSI では、広帯域の波長を指定できるブロードバンドフィルタ、および狭帯域の波長を指定できる液晶可変フィルタ-LCTF(Liquid Crystal Tunable Filter)により可視-近赤外波長の中から波長を絞って CCD センサーに入光させることが可能である。

ブロードバンドフィルタは Johnson-Cousins 測光系の U, B, V, Rc, Ic の 5 つが設定されており、必要に応じて切り替え可能である。

LCTF は波長域により VIS(400-720 nm)と SNIR(650-1100 nm)の 2 種類が用意されており、こちらも切り替え可能である。なお、ブロードバンドフィルタとの併用も可能である。

CCD センサーは浜松ホトニクス製 C9100-13 を使用している。この CCD センサーは読み出し時の転送電圧を変化させることにより信号を増倍させることのできる EM-CCD センサーである。本研究の観測では短い露光時間で撮像を行うため、信号増倍を行う EM-CCD モードを用いた。Table 2 に MSI の仕様、Fig. 13, 14 に本研究の観測で使用した V, Rc, Ic フィルタ、および LCTF の VIS, SNIR の透過率特性を示す。

Table 2 MSI の基本的な仕様[Watanabe et al., 2012]

Spectral coverage	360–1050 nm
Field of view	
Normal resolution mode	$3.3 \times 3.3$ arcmin ( $0.389$ arcsec pixel <sup>-1</sup> )
High resolution mode	$41 \times 41$ arcsec ( $0.080$ arcsec pixel <sup>-1</sup> )
Filters	
Liquid crystal tunable filters	CRi VariSpec VIS-10: 400–720 nm, $\Delta\lambda \sim 10$ nm (@ 650 nm), CRi VariSpec SNIR-10: 650–1100 nm, $\Delta\lambda \sim 10$ nm (@ 900 nm)
Narrow-band filters	360, 365, 370, 380, 390 nm ( $\Delta\lambda = 10$ nm), H $\alpha$ ( $\Delta\lambda = 1$ nm)
Broad-band filters	Johnson-Cousins <i>U, B, V, R, I</i>
Camera (CCD)	Hamamatsu Photonics C9100-13 (e2v CCD97 back-illuminated Electron Multiplying CCD)
Array format	$512 \times 512$ pixel (Pixel size: $16 \times 16$ $\mu\text{m}$ )
Readout modes	EMCCD mode, Normal CCD mode
Pixel clock rates	11 MHz (EMCCD mode only), 0.69 MHz, 2.75 MHz
Maximum frame rates (full-frame)	$31.9$ frames s <sup>-1</sup> (EMCCD mode), $2$ frames s <sup>-1</sup> (Normal CCD mode)
Minimum exposure times (full-frame)	$0.031$ s (EMCCD mode), $0.488$ s (Normal CCD mode)
EM gain	4–1200
CCD cooling method & temperature	Peltier with forced-air, $-65^\circ\text{C}$
Outer dimensions	$500$ (W) $\times$ $450$ (D) $\times$ $280$ (H) mm (only enclosure) $995$ (W) $\times$ $464$ (D) $\times$ $333$ (H) mm (including camera and electronics)
Weight	50 kg

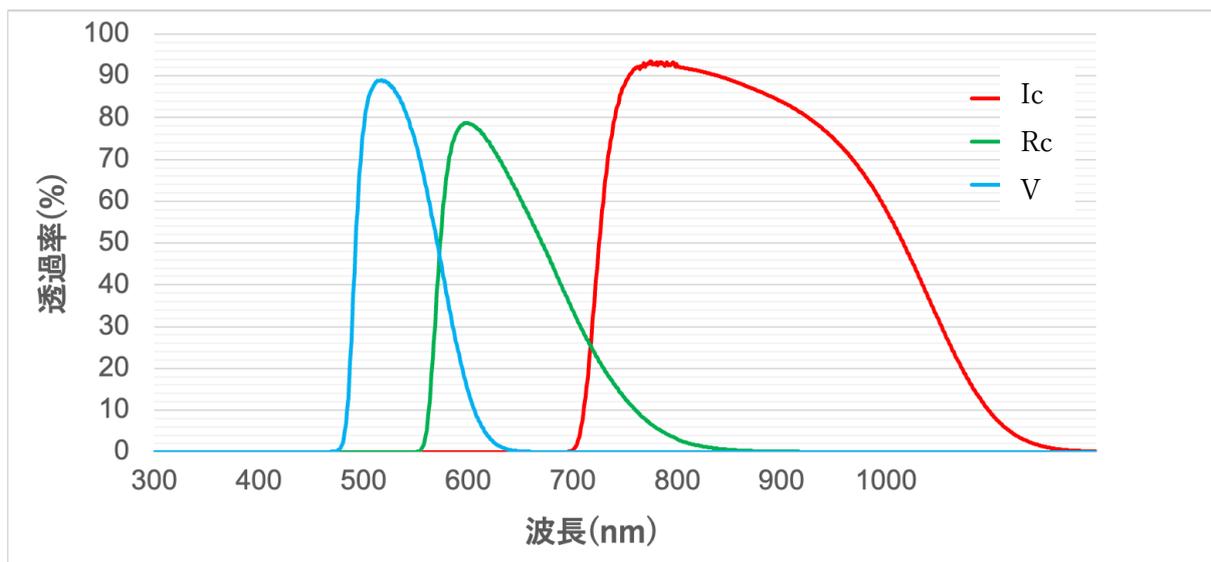


Fig. 13 観測で使したブロードバンドフィルタ (V, Rc, Ic) の透過率特性

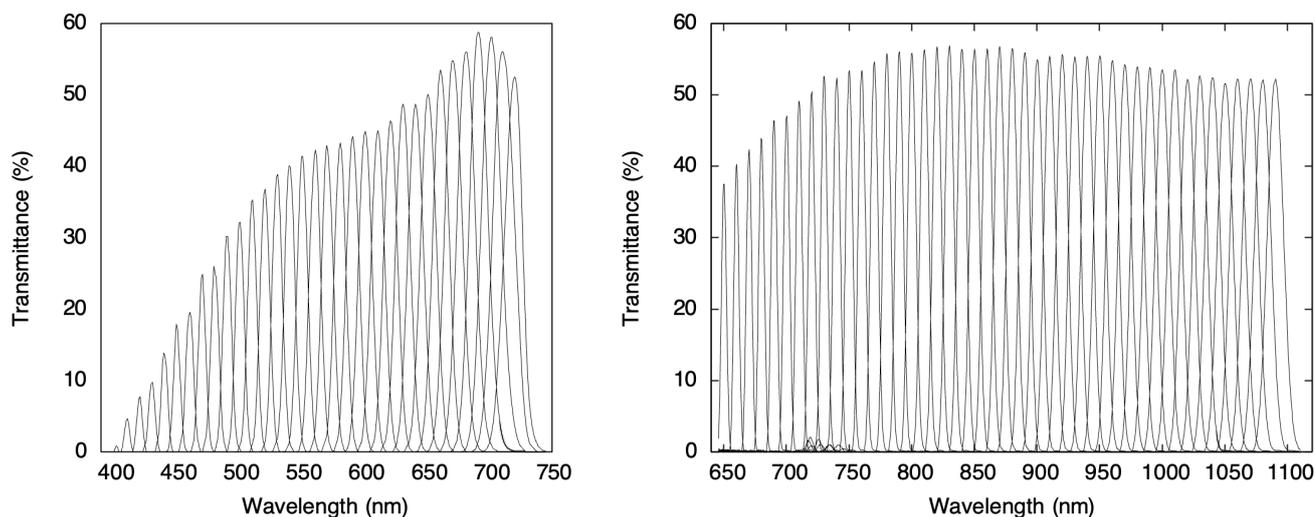


Fig. 14 LCTF の透過率特性 VIS(左)と SNIR(右)[Watanabe et al., 2012]

上述の通り、MSI 観測では、フィルタ切り替えとともに MSI の CCD センサ読み出し電圧を変化させることで、各波長における対象天体の明るさに応じた適切な感度設定・露光時間で観測を行った。具体的には、Eq. 2 で示される信号対雑音比(S/N)が 100 を上回り、尚且つ宇宙線を除く最高カウントが飽和値(65535)を取らないことを目安とした。

$$S/N = \frac{\sum t N_{obj}}{\sqrt{\sum t N_{obj} + 2(t N_{sky} + t N_{dark} + N_{readout}^2)}} \quad (\text{Eq. 2})$$

ここで、 $t$  は露光時間、 $N_{obj}$ 、 $N_{sky}$ 、 $N_{dark}$  そして  $N_{readout}$  はそれぞれ天体、背景光、暗電流(3-1 で後述)、そして読み出しノイズのカウントである。

## 2-3 実際の観測

本研究では、2023年7月-2024年3月および2024年8月-2024年12月の2シーズンにかけて天王星を観測した。各観測日において、ブロードバンドフィルター・LCTFフィルターによる観測を行い、データセットを取得した。

ブロードバンドフィルター観測ではV, Rc, Icの3つのフィルターで観測を行い、LCTFフィルターでは中心波長を600-642 nm、709-745 nmの間で3 nm刻みで変化させて観測を行った。

以下に、Table 3に名寄市立天文台から観測できた天王星の概況(2023年7月-2024年12月)、Table 4に2023年度シーズン、Table 5に2024年度シーズンの観測の記録を示す。

Table 3 各観測シーズンにおける天王星の概況

	見かけの等級(等)	視直径(秒角)	観測者直下点緯度(北緯, °)	太陽直下点緯度(北緯, °)	衝(日付)
2023年シーズン(2023年7月-2024年3月)	5.81-5.65	3.51-3.78	61.39-65.13	62.02-64.47	2023年11月13日
2024年シーズン(2024年8月-2024年12月)	5.74-5.64	3.62-3.79	65.84-68.93	66.21-67.45	2024年11月14日

Table 4 2023年度シーズンの観測の記録

日付	視直径(秒角)	露光時間(s)	使用フィルター	Sens	観測者直下点経度
2023.07.21	3.52	0.2	V	96, 128	289→33
2023.08.12	3.58	0.4,0.8	VIS(600, 620 and 640 nm)	128	176→239
2023.08.13	3.59	0.1	V	96	318→20
2023.08.14	3.59	0.3	VIS(600, 620 and 640 nm)	96	99→161
2023.09.15	3.69	0.6	VIS(600-642 nm)	130	277→339
2023.10.14	3.76	0.3-0.8	V	50, 80	30→92
2023.10.15	3.76	0.2-0.3	V	50	170→233
2023.10.18	3.76	1.0	VIS(620 nm)	80	234→297
2023.10.23	3.77	1.0	VIS(600, 620 nm)	80	220→283
2023.11.09	3.78	2.0	VIS(600-640 nm)	50	79→142
2024.02.04	3.61	5.0-10.0	VIS(600-642 nm)	0	95→158
2024.02.05	3.61	0.8	VIS(600-642 nm)	80	236→299
2024.02.07	3.60	0.1-0.7	V, Rc, Ic	80	159→221
		1.0	VIS(600-642 nm)		
		3.0	SNIR(709-745 nm)		
2024.02.18	3.57	0.1-0.7	V, Rc, Ic	50	271→331
		1.0	VIS(600-642 nm)	80	
		2.0	SNIR(709-745 nm)		
2024.03.06	3.52	0.12-0.7	V, Rc, Ic	80	183→204
		1.0	VIS(600-642 nm)		
		2.0	SNIR(709-745 nm)		

Table 5 2024 年度シーズンの観測の記録

日付	視直径(秒角)	露光時間(s)	使用フィルタ	Sens	観測者直下点経度
2024.08.24	3.62	0.122-0.4 s	V, Rc, Ic	50, 80	138.62→201.30
		1.5, 1.0 s	600-642 nm(/3 nm)	50, 80	
2024.09.06	3.66	0.2-1.0 s	V, Rc, Ic	50	315.56→34.11
2024.09.07	3.66	0.1-0.5 s	V, Rc, Ic	50	96.76→159.41
		1.0 s	600-642 nm(/3 nm)	80	
		2.0 s	709-745 nm(/3nm)	120	
2024.09.08	3.67	0.1-0.4 s	V, Rc, Ic	50	237.96→300.61
		1.0 s	600-642 nm(/3 nm)	80	
		1.5 s	709-745 nm(/3nm)	120	
2024.09.17	3.69	0.2, 0.5 s	V, Rc, Ic	50	68.72→131.37
		1.0 s	600-642 nm(/3 nm)	80	
2024.09.22	3.71	0.2, 0.1 s	V, Rc, Ic	50	54.67→117.31
		1.5 s	600-642 nm(/3 nm)	80	
		5.0, 1.5 s	709-745 nm(/3nm)	120	
2024.09.28	3.72	0.1-0.5 s	V, Rc, Ic	50	119.11→244.40
		1.0 s	600-642 nm(/3 nm)	80	
		3.0 s	709-745 nm(/3nm)	120	
2024.09.30	3.73	0.1-0.4 s	V, Rc, Ic	50	104.11→166.76
2024.10.09	3.75	0.1-0.6 s	V, Rc, Ic	50	294.65→357.30
		1.0 s	600-642 nm(/3 nm)	80	
		3.0 s	709-745 nm(/3nm)	120	
2024.10.13	3.76	0.1-0.7 s	V, Rc,Ic	50	137.92→200.57
		1.0 s	600-642 nm(/3 nm)	80	
		3.0 s	709-745 nm(/3nm)	120	
2024.10.14	3.76	0.1-0.4 s	V, Rc,Ic	50	237.35→320.89
		1.0 s	600-642 nm(/3 nm)	80	
		5.0 s	709-745 nm(/3nm)	120	
2024.10.25	3.78	0.1-0.4 s	V, Rc,Ic	50	350.48→74.00
		1.0 s	600-642 nm(/3 nm)	80	
2024.10.26	3.78	0.1-0.4 s	V, Rc,Ic	50	110.78→194.31
		1.0 s	600-642 nm(/3 nm)	80	
2024.10.28	3.78	0.1-0.4 s	V, Rc,Ic	50	33.16→116.69
		1.0 s	600-642 nm(/3 nm)	80	
		3.0 s	709-745 nm(/3nm)	120	
2024.11.02	3.79	0.1-0.4 s	V, Rc,Ic	50	19.08→102.61
2024.11.11	3.79	0.1-0.4 s	V, Rc,Ic	50	209.68→272.33
		1.5 s	600-642 nm(/3 nm)	80	
		4.0 s	709-745 nm(/3nm)	120	
2024.12.08	3.78	0.1-0.4 s	V, Rc,Ic	50	358.42→61.07
		1.0 s	600-642 nm(/3 nm)	80	
2024.12.23	3.75	0.1-0.4 s	V, Rc,Ic	50	315.59→18.24
		1.0 s	600-642 nm(/3 nm)	80	

## 第3章 解析

### 3-1 一次処理(撮像観測)

MSI のセンサーには出力するカウント値がマイナスとならないように光が入射するとき以外にも暗電流がかけられている。取得した画像のカウント値は全てこの暗電流によるカウント(バイアスという)が足された状態となっているので、使用する全てのフレームからバイアスカウントを引く必要がある。予め絞りを閉じ、最小露光時間で記録したフレーム(バイアスフレーム)を用意し、使用するフレームからバイアスフレームのカウントを引き算する。これをバイアス引きという。

また、取得した画像にはセンサーの感度特性の影響も含まれており、均一光源を使用したフラットフィールドで割り算することでこの影響を取り除く必要がある。これをフラット割と呼ぶ。本研究では、フラットフィールドの取得に均一光源を用いたドームフラットを使用した。

以上の手順を実行した一次処理済みフレームのカウント値は以下の Eq. 3 で示される。

$$\textit{Primary Processed Count}(x,y) = \frac{\textit{Raw}(x,y) - \textit{Bias}(x,y)}{\textit{Flatfield}(x,y)} \quad (\text{Eq. 3})$$

ここで、ドームフラットフレームから各ピクセルにおける感度特性の値である  $\textit{Flatfield}(x,y)$  を導出するために、Eq. 4 を用いた。

$$\textit{Flatfield}(x,y) = \frac{\textit{DomeFrame}(x,y) - \textit{Bias}(x,y)}{\textit{DomeFrame}(x,y)} \quad (\text{Eq. 4})$$

### 3-2 フレーム選定・測光

一次処理を行ったフレームに対し、天王星の星像を検出し、星像の状態をもとに地球大気による散乱(シンチレーション)が少ないフレームを選定する。

まず、星像の検出には Astropy の Photutils パッケージ内にある DAOSTarFinder というライブラリを用いた。これは、画像内に於いて閾値を超えるカウント値を持つピクセル周辺で、X 軸方向、Y 軸方向に対してガウシアン分布をフィッティングし、それぞれの分布のピーク値と推定される X,Y 座標を中心座標として決定するものである。

星像の検出後、高速撮像フレームの中から星像半径が小さいものを順に選出し、上位 5 フレームを採用フレームとした。

採用フレームの星像領域に対して 2 通りの測光を行った。1 つは天王星ディスク全体の測光(Fig. 15 左)、もう 1 つは天王星ディスクを 2 分割した測光(Fig. 15 右)である。なお、測光とは背景光カウント(ここではフィッティングに用いた閾値とした)を引いたカウント値を合計することである。

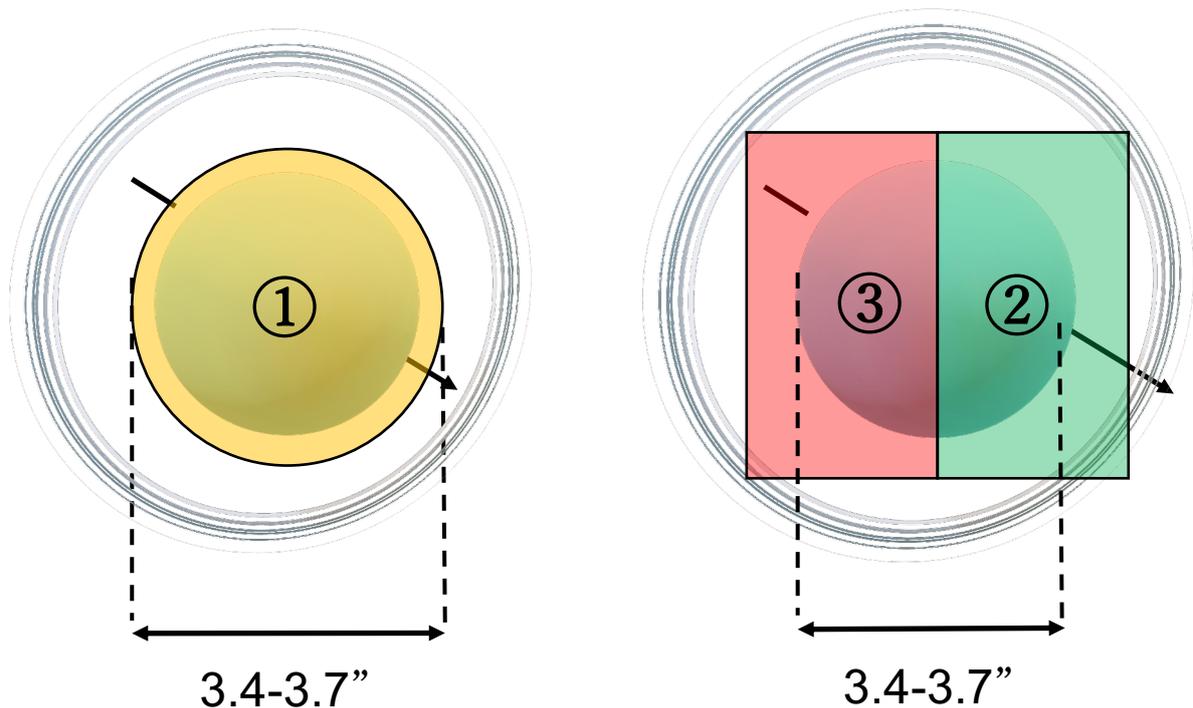


Fig. 15 全体測光(左)と分割測光(右)の領域図。①②③各領域のピクセルにおけるカウントを足し上げる

最後に、左右各領域の測光値をディスク全体のカウント値で除することにより、左右領域の輝度の星像全体に占める比(輝度比 $Br_{\textcircled{2}}$ ,  $Br_{\textcircled{3}}$ )を導出した(Eq.5-1, 5-2)。

$$Br_{\textcircled{2}} = \frac{\sum_{\textcircled{2}} \text{Primary Processed Count}(x,y)}{\sum_{\textcircled{1}} \text{Primary Processed Count}(x,y)} \quad (\text{Eq. 5-1})$$

$$Br_{\textcircled{3}} = \frac{\sum_{\textcircled{3}} \text{Primary Processed Count}(x,y)}{\sum_{\textcircled{1}} \text{Primary Processed Count}(x,y)} \quad (\text{Eq. 5-2})$$

### 3-3 模擬画像導出

測光画像との比較を行うため、天王星・太陽・地球(観測者)の座標情報・分光観測を元に得られたアルベド情報を使用し、天王星模擬画像の生成を行った。

まず、各観測日における天王星・太陽・地球のジオメトリ情報を取得した。取得元はカリフォルニア工科大学ジェット推進研究所が運営している Horizon System (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html>)を使用した。取得した情報は、地球-天王星間の距離  $R$ 、天王星における観測直下点緯度・経度  $\varphi_{obs}$ ,  $\theta_{obs}$ 、天王星における太陽直下点緯度・経度  $\varphi_{sun}$ ,  $\theta_{sun}$ 、地球-天王星中心と天王星の自転軸がなす角  $\alpha$  である。また、天王星半径を  $r$  とする。

このとき、天王星中心から太陽直下点までのベクトル  $\vec{L}_{sun}$ 、観測者直下点までのベクトル  $\vec{L}_{obs}$  はそれぞれ Eq. 6-1, 6-2 のようになる。

$$\vec{L}_{sun} = \begin{pmatrix} r \cos \theta_s \cos(\varphi_s - \varphi_o) \\ r \cos \theta_s \sin(\varphi_s - \varphi_o) \\ r \sin \theta_s \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 6-1})$$

$$\vec{L}_{obs} = \begin{pmatrix} r \cos \theta_o \cos(\varphi_o - \varphi_o) \\ r \cos \theta_o \sin(\varphi_o - \varphi_o) \\ r \sin \theta_o \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 6-2})$$

そして、今井 (2013)を参考に天王星の赤道面を X, Y 平面とした座標系(X,Y,Z)、観測者側に CCD センサーの平面を x,y 方向とした(x,y,z)という座標系を想定する (Fig. 16)。)

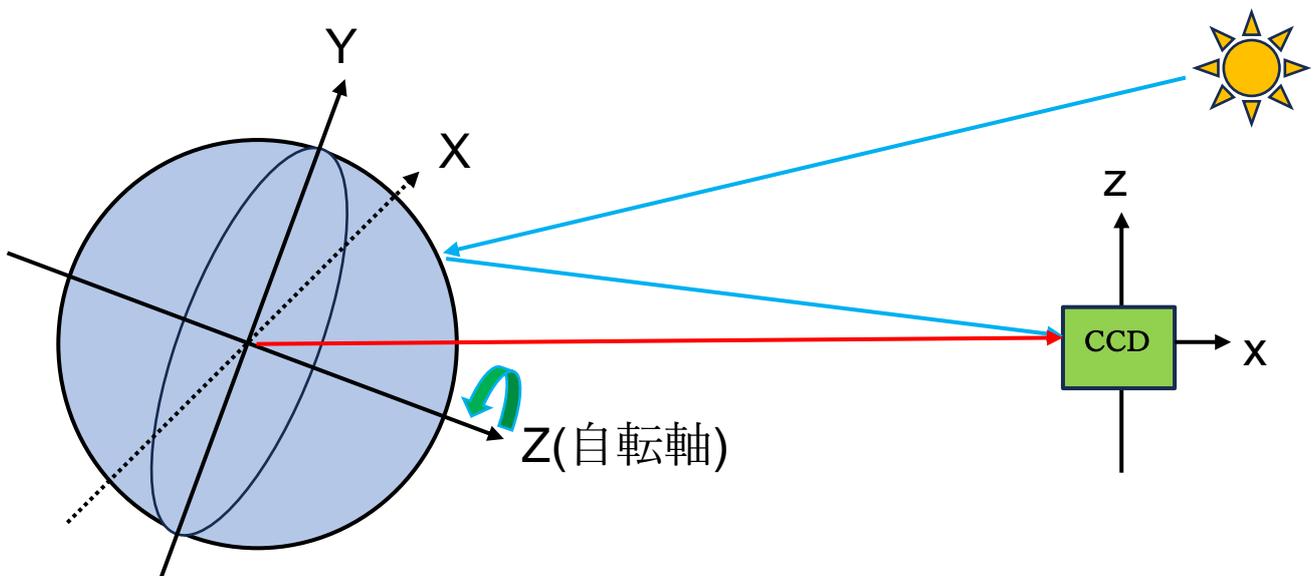


Fig. 16 天王星・太陽・観測者(CCD)間の位置の概略図

模擬画像の出力にあたって、観測した各波長における天王星のアルベド情報が必要である。本研究では、京都産業大学が所有する神山天文台の荒木望遠鏡に設置された分光器 VESPolA [Arasaki et al., 2015] による天王星のスペクトル、Karkoshka (1994) および Karkoshka (1998) で提示されたアルベドを参考に、天王星ディスク全体 (Fig. 15 ①) のカウントが天王星アルベドおよび各フィルタの透過率に比例すると仮定し、各フィルターにおける輝度関数  $\alpha(\lambda)$  を Fig. 17 のように設定した。

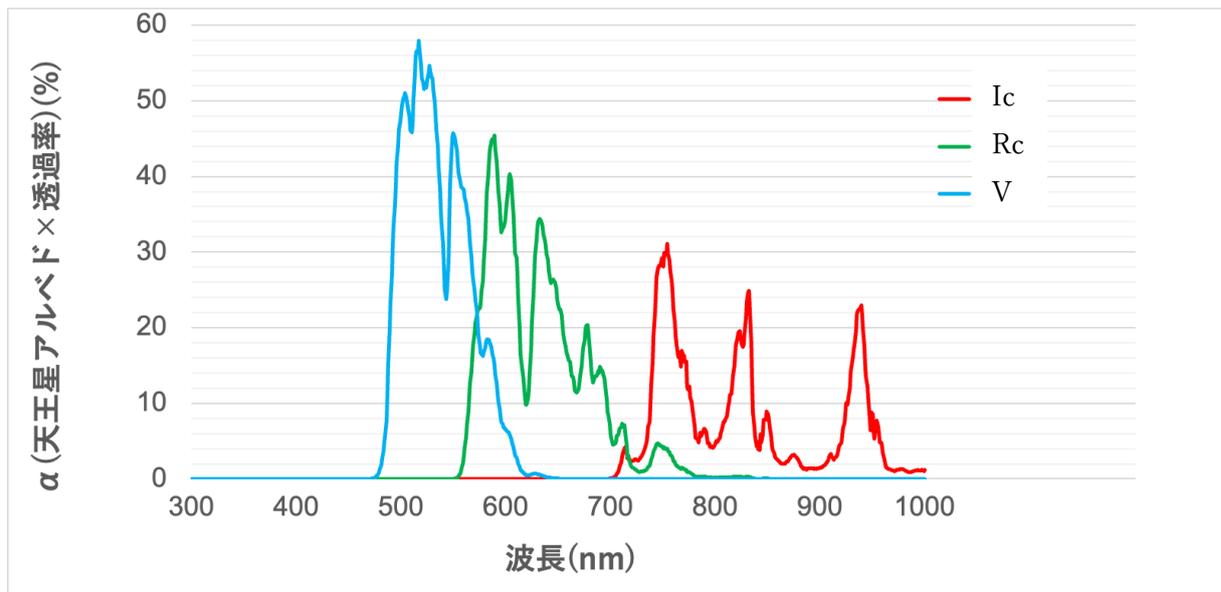


Fig. 17 各フィルターを通した輝度関数  $\alpha(\lambda)$

最後に、局所雲の移動を再現するために天王星を経度方向に  $30^\circ$  ごとに分割するグリッドを作成し、特定のグリッドの中に高アルベド領域を作成した (Fig. 18)。なお、通常の高アルベド領域 (局所雲) の輝度関数を定数  $k$  ( $k > 1.0$ ) を使用して  $\alpha_{br}(\lambda) = k\alpha(\lambda)$  とした。

実際の模擬画像の作成では局所雲を想定した高アルベド経度領域を作成し、 $k = 2.0$  とした。また、模擬画像の出力と同時に領域②、③における輝度比を求め、観測における撮像画像に対する測光と比較できるようにした。

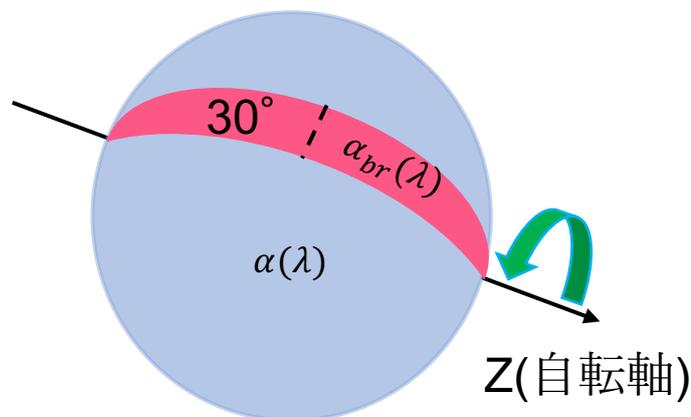


Fig. 18 局所雲を想定した高輝度領域のイメージ

最後に、天王星の各領域について反射光ベクトル  $\vec{L}_{ref}$  が Eq. 7 のように計算できると想定し、CCD へ投影される星像の計算を行った。

$$\vec{L}_{ref} = \alpha(\lambda) \vec{L}_{obs} (\vec{L}_{obs} \cdot \vec{L}_{sun}) \quad (\text{Eq. 7})$$

計算し取得した星像について、Scipy の Gaussian\_filter パッケージを使用し、書く観測日のシーイングを再現した上で画像を出力した。

また、出力した画像に対しても MSI 観測画像と同様に測光を行い、Eq. 5-1, Eq. 5-2 で示される輝度比をプロットした。

## 第4章 結果

MSI による撮像観測画像の輝度比と、生成した模擬画像への測光結果を順に提示する。

### 4-1 撮像観測

ブロードバンドフィルタ各波長における領域②,③の輝度比  $Br_2$ ,  $Br_3$  を示す (Fig. 19)。

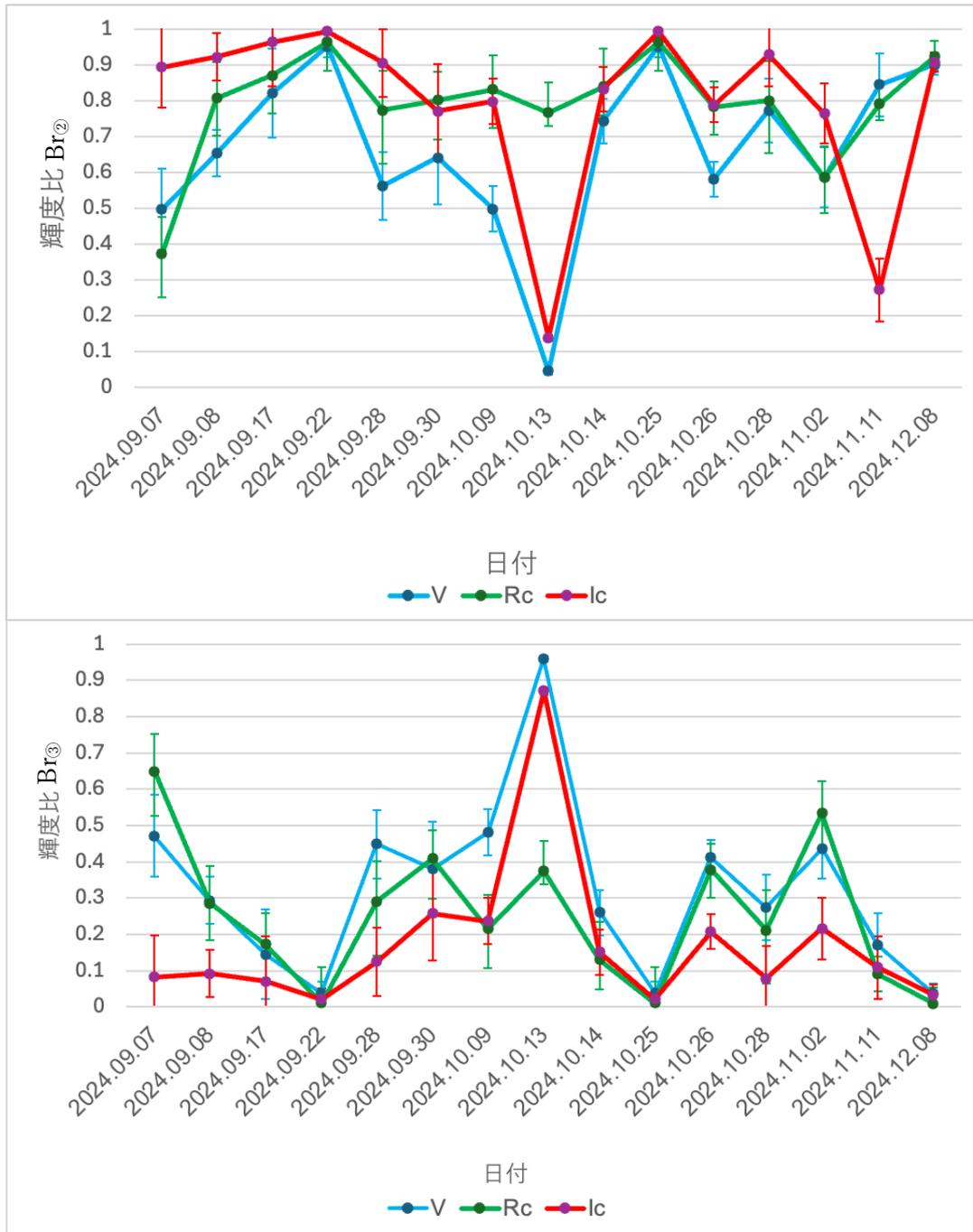


Fig. 19 領域②(上図), ③(下図)の星像全体に対する輝度比変化。エラーバーは採用した複数フレームの測光結果における標準偏差

Fig. 19 で示した領域②・③の輝度比変化から、2024 年 10 月 13 日を除き、領域②における輝度比が概ね領域③の輝度比の 2-3 倍程度の値を取っていることがわかる。2024 年の観測シーズンにおいては、天王星は地球に北半球側を向けており (Fig. 20)、領域②は直下点よりも高緯度、領域③は低緯度の領域であると考えられる。高緯度側の領域の輝度が高いことは、極周辺の高アルベド領域である極冠の検出を支持する結果である。

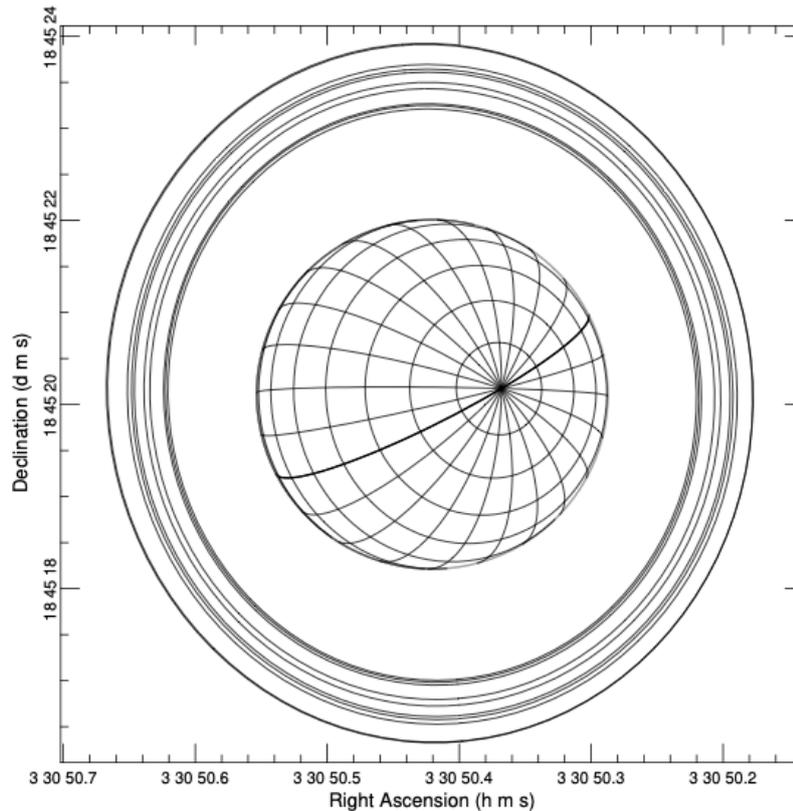


Fig. 20 Uranus Viewer 3.1 ([https://pds-rings.seti.org/tools/viewer3\\_ura.html](https://pds-rings.seti.org/tools/viewer3_ura.html)) により出力した 2024 年 11 月 15 日 0:00(UTC+9)における天王星ジオメトリ図。この日の観測者直下点緯度は北緯  $66.2^{\circ}$  である。

次に、ブロードバンドフィルタ毎の傾向の比較を行う。Fig. 21-23 に、各ブロードバンドフィルタ(V, Rc, Ic)における領域②,③の輝度比の変化を示す。

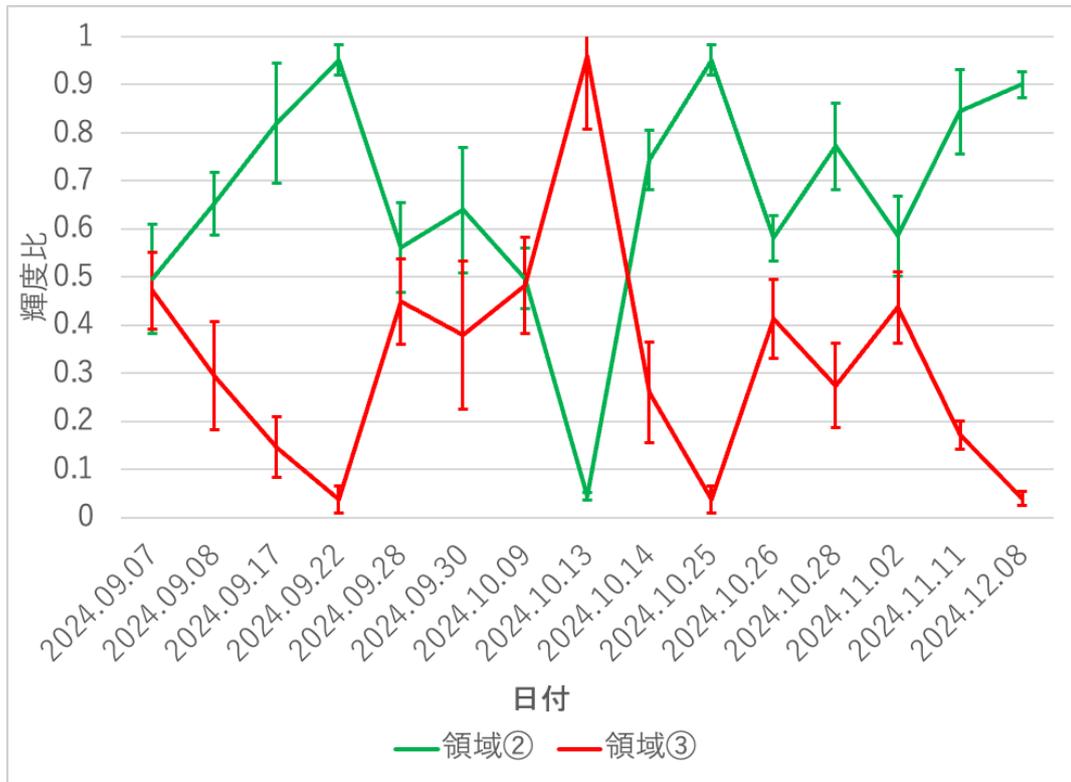


Fig. 21 V フィルタによる撮像結果における領域②,③の輝度比変化。エラーバーは採用した複数フレームの測光結果における標準偏差

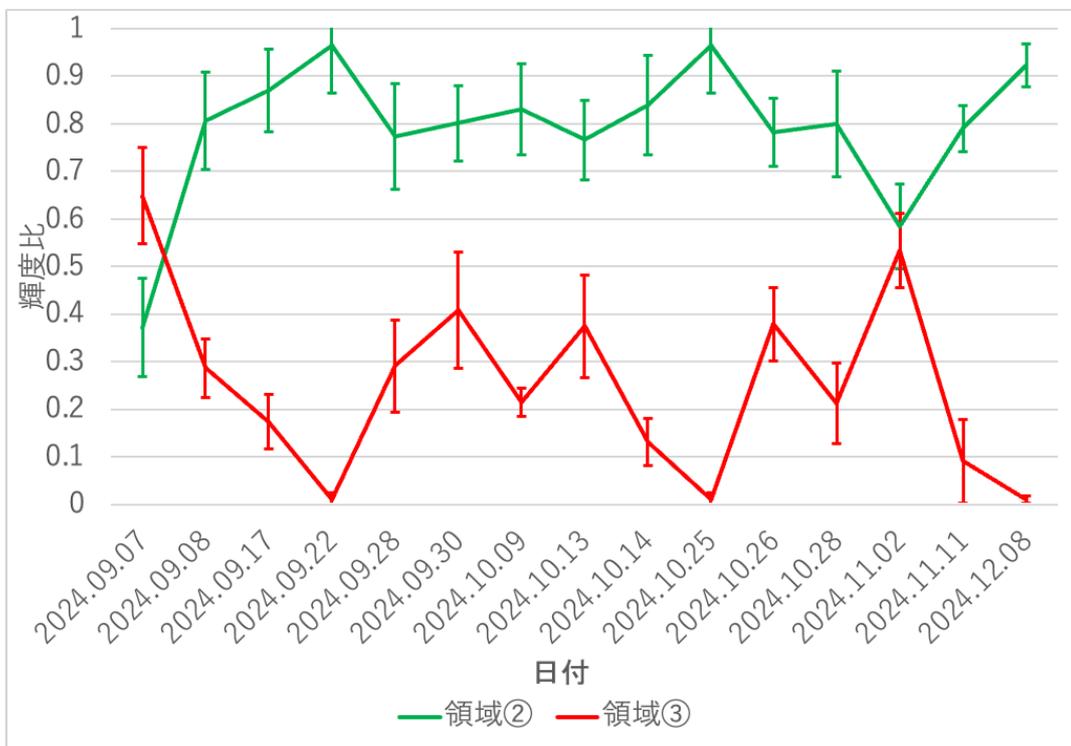


Fig. 22 Rc フィルタによる撮像結果における領域②,③の輝度比変化。エラーバーは採用した複数フレームの測光結果における標準偏差

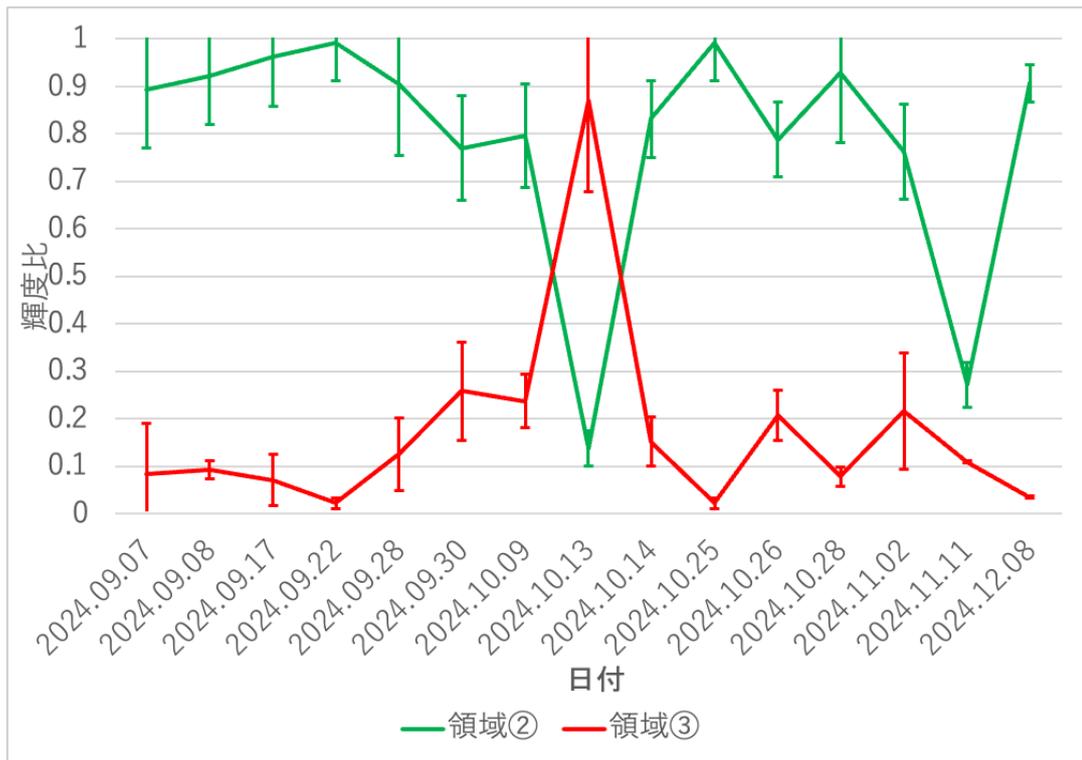


Fig. 23 Ic フィルタによる撮像結果における領域②,③の輝度比変化。エラーバーは採用した複数フレームの測光結果における標準偏差

Fig. 21-23 より、領域②,③の輝度比変化には各フィルタで領域③により領域②の方が明るい傾向が見られる。しかし、V フィルタの測光結果では、特に 9 月 28 日-11 月 2 日において、領域②,③が近い値をとっており(各領域のエラーバーも重なっている)、これは同日の Rc, Ic フィルタにおける輝度比には見られない傾向である(Ic フィルタにて輝度比が逆転している 2024 年 10 月 13 日については 5 章にて後述)。

ここで、Fig. 11 で提示したハッブル宇宙望遠鏡による分光撮像観測画像に注目すると、467 nm および 547 nm では極冠による輝度コントラストがほとんど見られず、619 nm, 763 nm および 845 nm では明瞭である。

本研究で用いたブロードバンドフィルタはそれぞれ Fig. 13 のような透過率特性を持つため、仮に天王星上に極冠が出現していたとしても 517 nm をピークに持つ V フィルタではコントラストが小さく、598 nm をピークに持つ Rc フィルタ、783 nm をピークに持つ Ic フィルタでは比較的大きいコントラストが見られると想定される。このため、V フィルタと Rc, Ic フィルタで輝度比の傾向が異なる観測日については、極冠の検出に成功している可能性があるかと推定される。

## 4-2 模擬画像

まず、観測日(本論文では 2024 年 10 月 28 日の例を示す)におけるピリカ望遠鏡の観測サイトから見た天王星星像を Fig. 24 のよう出力した。なお、Fig. 24 は Rc フィルタにおける輝度関数  $\alpha(\lambda)$  を使用したものである。

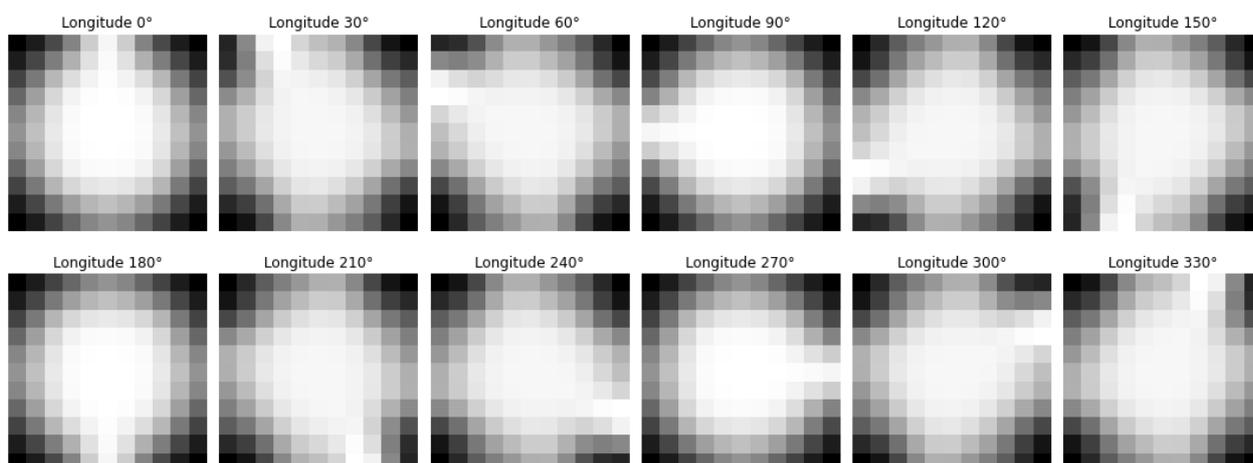


Fig. 24 Rc フィルタにおける輝度関数  $\alpha(\lambda)$  を使用して作成した模擬画像の一覧。ジオメトリパラメータは 2024 年 10 月 28 日のものを用い、それぞれの写真の上を示してあるのは観測者直下点経度である。高アルベド領域は経度 30-60° の間の領域とした。

また、高アルベド領域の数を変化させた時の輝度比変化を示したものが Fig. 25-26 となる。

Fig. 25, 26 では領域②,③のそれぞれの輝度分布の変化は再現できているが、 $Br_2$  に対する  $Br_3$  の輝度比の差分は約 20 %程度であり、50 %以上である観測結果を再現できていない。このため、模擬画像の測光結果と観測画像の結果を比較して局所雲追跡を行うことは困難であると考えられる。

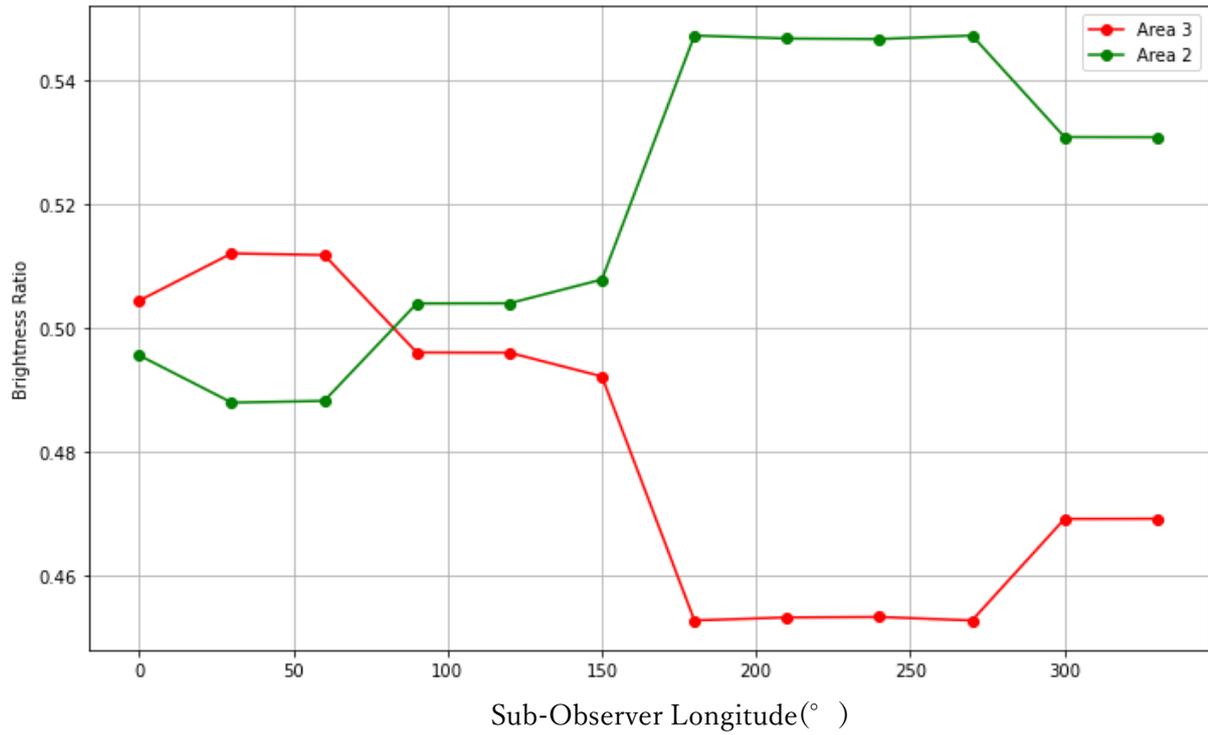


Fig. 25 高アルbedo領域を 30-60° のみとした時の分割測光シミュレーション

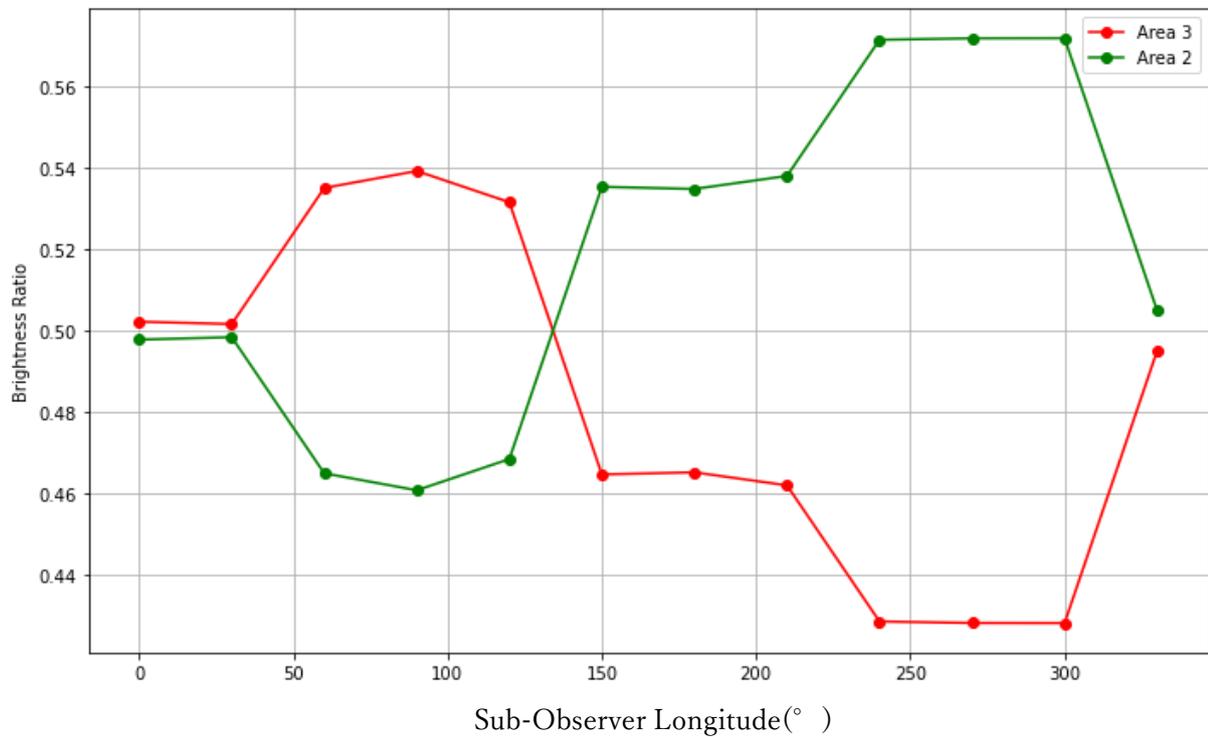


Fig. 26 高アルbedo領域を 30-60°、および 120-150° とした時の分割測光シミュレーション

## 第5章 考察

### 5-1 測光結果の妥当性

#### 5-1-1 シーイングの影響

観測シーズンにおける天王星の理論的な視直径は約 3.7 秒角であるが、実際の観測においては地球大気などのシーイング条件によって視直径が変化する。MSI による撮像観測における空間解像度を評価するにあたっては、地球大気による擾乱を考慮する必要がある (Fig. 27)。

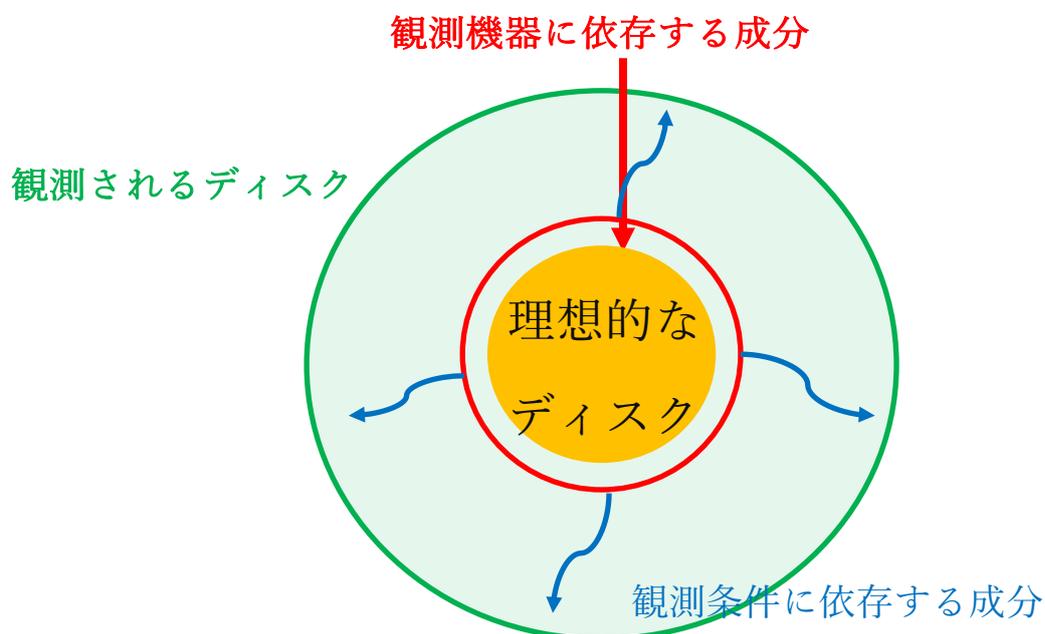


Fig. 27 実際に観測される星像は観測機器と当日の観測条件に依存して大きくなる(ぼやける)

シーイングを左右する要素は観測波長・観測する望遠鏡の口径といった固定的なもの他に、観測時の気象条件に依存するシンチレーションがある。気象条件によるシンチレーション周波数  $f_0$  (Hz) は、観測条件下での各大気層における風速  $v(h)$  に依存し、定数  $C_n$ ,  $k$  を使用して Eq. 8 のように示される [Greenwood, 1977]。

$$f_0 = [0.102k^2(\sec\zeta) \int dh C_n^2(h)v^{\frac{3}{5}}(h)]^{\frac{3}{5}} \quad (\text{Eq. 8})$$

$v(h)$  が一定であると過程した時、シンチレーション周波数  $f_0$  (Hz) は Eq. 9 のように示される。

$$f_0 = 0.43 \frac{v}{r_0} \quad (\text{Eq. 9})$$

この時、 $r_0$  は星像の理論上の半径である。

また、シンチレーションの影響が一定となる時間を Coherence Time と呼び、風速の平均  $\bar{v}$  (m/s) を使用して Eq. 10 における  $\tau_0$  (s) のように示される [合田, 2014]。

$$\tau_0 = 0.31 \frac{r_0}{\bar{v}} \text{ (Eq. 10)}$$

例として、 $v(h) = 1.2$  (m/s) で一定と仮定した時、シンチレーション周期は  $f_0 = 8.6$  (Hz)、Coherence Time は  $\tau_0 = 0.016$  (s) となるため、シンチレーションを克服するには 0.016 (s) 以下の露光時間が必要である。

Table 5 より、2024 年度におけるブロードバンドフィルター観測の露光時間は 0.1-0.4 秒間である。また、分割測光を行った長方形の短辺の視直径は約 1.9 秒角である。

この条件で許容される  $v(h)$  を Eq. 10 を元に計算すると、0.5-1.9 (m/s) となる。気象庁のアメダス設置点「名寄」によると、風速がこの条件以下であった観測日は、2024 年度シーズンでは 9/7, 9/22, 9/28, 9/30, 10/9, 10/26, 10/28, 11/11, 12/8, 12/23 の 10 日間であった。

実際に、9/7 に Rc フィルタで観測された天王星ディスクを点像分布関数に近似し、その半値全幅(FWHM: Full Width Half Maximum)と理想的な天王星ディスク半径の差分をとったものを計算すると、最大で 1.5 秒角であった。この値を観測時のシーイング値と仮定すると、本研究で採用した短辺 1.9 秒角の分割測光に対して十分な解像度を持っている可能性が高い。

しかし、9/7 の Rc フィルタによる観測画像に対する測光結果に注目すると、②,③領域の輝度比が他の日の傾向とは異なり反転している。アメダスでは風速が条件を満たさない観測日(10/13)では、極冠の検出を支持する ( $Br_{②} > Br_{③}$ ) 傾向が見られている。

アメダスの風速出力は 10 分ごとであるため、観測時刻のその瞬間の風速ではない。このため、風速によるシンチレーションの議論には、露光時間と同時の風速情報を取得する機構が必要である。

また、今回は高度ごとの風速  $v(h)$  が一定であると仮定しているが、実際には高度ごとの風速は異なる。このため、実際のシンチレーションを確認するためには、天王星と同じフレームに恒星を入れて撮像するか、露光時間と同時に別の観測機器で恒星を高速撮像し、シンチレーションの周波数を測定する手法を取ることが必要と考えられる。

## 5-1-2 星像中心の決定について

仮にシーイング条件が極冠による輝度差が検出できる条件であったとして、実際の測光結果は画像上の測光領域の決定方法にも左右される。

本研究の観測画像に対しては、星像検出において Astropy の Photutils パッケージにおける DAOSStarFinder というパッケージを使用した。これは、使用する画像内で閾値を超えたカウントのピクセルの周辺に、X 軸方向、Y 軸方向に対してガウシアン分布をフィッティングしてピーク値と推定される X,Y 座標を中心座標として決定するものである。このため、星像の中心から離れた場所に相対的に高いカウントの領域が集中している場合、DAOSStarFinder によるガウシアンフィッティングに誤差が出る可能性がある。

測光結果で中心がずれている可能性を検証するため、地表における風速が 1.9 (m/s) よりも低速で、極冠の検出ができていない可能性のある観測日(2024 年 10 月 09 日)の取得画像において、V フィルタ(極冠が観測できなかった波長)と Rc および Ic フィルタ(極冠が観測できた)で測光に使用した中心座標をプロットした結果を出力した(Fig. 28)。

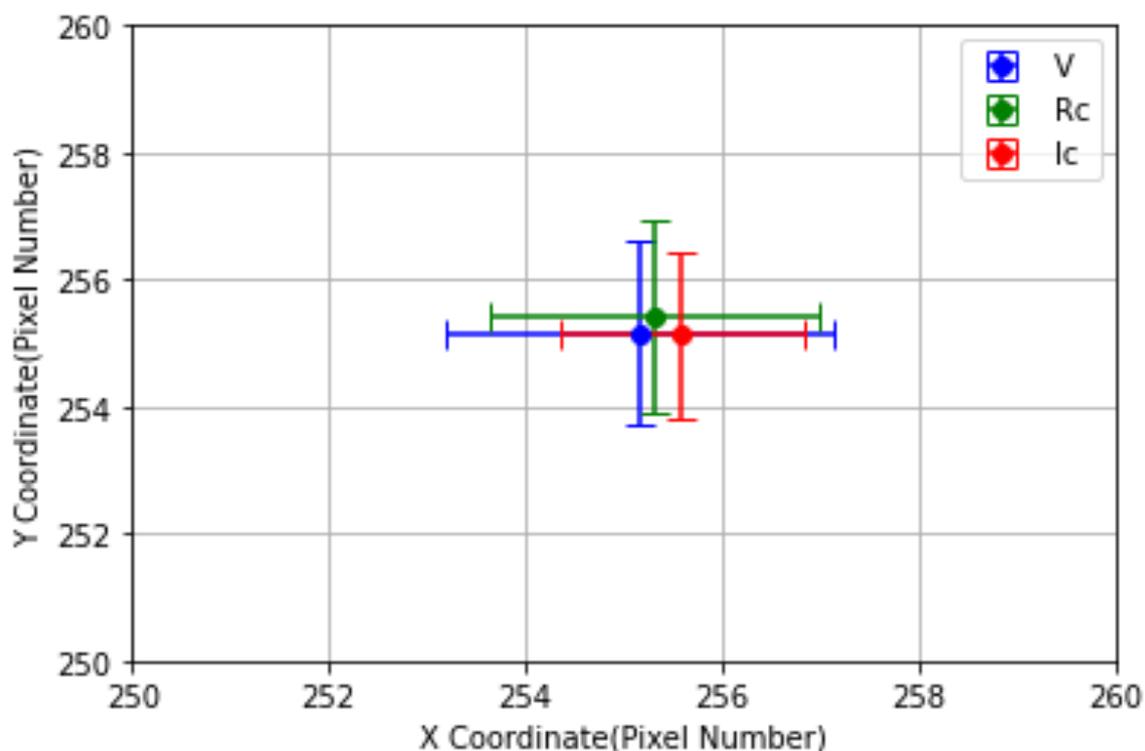


Fig. 28 各フィルタ画像において検出された中心座標の分布。エラーバーは複数フレームにおける座標の標準偏差。

V, Rc, Ic フィルタに共通して中心座標の分布範囲は概ね 1 ピクセルの間にあり、それ

ぞれのエラーバーの範囲内に分布している。理想的なシーイング条件での画像上での天王星ディスクの直径が 20 ピクセルであり、分割測光範囲の短辺が 10 ピクセルであることを考慮すると、極冠による中心座標のずれの輝度比  $Br_{②}$ ,  $Br_{③}$  に対する影響は 10 %以内であると考えられる。

## 5-2 模擬画像の妥当性

本研究の最終目的である局所雲の位置推定には、観測における測光と比較するための模擬画像の妥当性について議論する必要がある。

模擬画像導出にあたっては、Horizon System より取得した天王星ジオメトリ情報、極冠と局所雲を再現するために簡易的に位置を設定した高アルベド領域、そして観測時のシーイングを再現するために Scipy の Gaussian Filter パッケージを使用した。

これは本来、画像に含まれるノイズをガウシアン近似によって除去するものであるが、今回は出力する模擬画像のカウント値に対してシーイング条件の再現を行うため、ガウシアン分布の標準偏差を 2.0 秒角 に設定して出力を行ったものを掲載した。また、局所雲の経度を変化させず標準偏差のみを変化させ 1.0, 3.0, 4.0 秒角として輝度比を導出したが、グラフの値に変化はなかった。シーイング条件による輝度比変化を再現するためには、作成した模擬画像に対するマスクに別のライブラリを用いる必要があると考えられる。

しかし、実際の各観測フレームでは風速によるシーイング条件の変化が存在するため、標準偏差を連続的に変化させ、シーイング条件の変化を再現する必要がある。

また、今回は局所雲による輝度変化を経度方向の幅  $30^\circ$ 、周囲の輝度と比較して 2.0 倍の高輝度経度グリッドによって再現することを試みたが、経度方向に広範囲に分布している。実際の観測結果と比較し局所雲を移動速度を推定するためには、この高輝度グリッドを経度方向に細分化し、局所雲のアルベド分布をより連続的に分布させる必要があると考えられる。

## 第6章 まとめ

天王星大気の上部成層圏では、2007年の春分点以降、600 nm以上の波長で極冠や局所雲等の特徴が観測されている。特に0.3-0.7 barに分布すると考えられている局所雲は、大気成分であるCH<sub>4</sub>の対流構造に密接に関わり、天王星対流圏の気象を理解するのに重要な構造であるが、特定の局所雲の移動速度の変化に注目して1週間-1ヶ月の追跡が行われた例は存在しない。今後の天王星観測ミッションにおける観測機器を検討する上でも、局所雲を継続的に観測する手法を確立する必要がある。

本研究では、天王星上部対流圏における局所雲の移動速度を計測するため、分光撮像観測装置を使用し観測を行い、観測時と条件を揃えた簡易的な星像シミュレーションを使用して評価した。

観測結果では、風速による星像の擾乱を克服できた一部の観測日において、極冠によると考えられる輝度分布を検出することができた。風速データベース(アメダス)から出力される情報が10分間隔であり、露光時刻におけるシーイングを推定することが困難であった。測光精度の向上および露光時間におけるシーイング条件推定のため、天王星撮像と同時刻に近い視野での恒星撮像の必要があると考えられる。

模擬画像出力では、天王星上に経度30°の幅を持った高輝度領域を置くことで、局所雲の移動の再現を試みた。その結果、測光領域によって星像全体に対する輝度比が異なることは再現できたものの、観測結果との比較を妥当なものとするには、局所雲のグリッドへの条件をより細分化する必要があると考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、非常に多くの方のお世話になりました。

指導教員である高木聖子講師にはデータの解析方法、研究方針について非常に多くのご指導をいただき、研究を支えていただきました。研究を行う者としての心構えから資料作成におけるお作法まで、お忙しい中細やかにご指導をいただきました。また、未熟な私に何度も学内外での議論の場を下さり、ありがとうございました。

高橋幸弘教授、佐藤光輝教授そして久保田尚之特任准教授にはピリカ望遠鏡の管理や天文観測の知識・機会を授けてくださりました。

内藤博之様はじめ、名寄市立天文台の皆様には望遠鏡や撮像装置などの設備管理を行なっていただき、常に円滑な観測を助けていただきました。

ピリカ望遠鏡を使用した先行研究を行っていた諸先輩方には、様々な助言を頂きました。特に大野辰遼様には光学装置の基本的な仕組み等、本研究に不可欠な知識を習得する機会を頂きました。濱本昂様には、観測機械の操作・管理方法を教えていただいたほか、MSI 画像や分光観測データへのアプローチに関するアイデアをいただきました。東京大学の今井正堯様には、模擬画像作成に欠かせない座標設定等のシミュレーションの手法をご教授いただきました。

京都産業大学の佐川秀雄様、長谷川龍様には、お忙しい中急遽荒木望遠鏡による観測にご協力いただき、模擬画像の作成に欠かせない分光データをご提供いただきました。

同じ研究室の仲間である田沼雄太様、中嶋瑞穂様、金野敦様そして土井知也様には、同じピリカ望遠鏡ユーザーとして観測を共に行ったほか、活発な議論をさせていただき、研究の大きな励みになりました。

その他、惑星宇宙グループをはじめとした理学部地球惑星科学科の方々には初めての研究生生活を支えていただく数々の助言・指導をいただきました。

最後に、私の家族・友人にはこれまでの私の学業・生活を心身ともに最後まで支えていただきました。

お世話になりました全ての方々にこの場を借りてお礼を申し上げます。

## 参考文献

- Alex Akins, Mark Hofstadter, Bryan Bulter, A.James Friedson,, Edward Molter, Marzia Parisi, Imke de Peter (2023) Evidence of Polar Cyclone on Uranus from VLA Observations Astro-ph.EP doi:10.48550/2305.15521
- Allison Michael, Beebe Reta F., Conrath Barney J., Hinson David P., Ingersoll Andrew P. (1991), Uranus atmospheric dynamics and circulation IN: Uranus (A92-18701 05-91). Tucson, AZ, University of Arizona Press, 1991, p. 253-295
- Amy A. Simon, Michael H. Wong, Lawrence A. Sromovsky. Leigh N. Fletcher and Patrick M. Fry (2022), Giant Planet Atmosphere: Dynamics and Variability from UV to Near-IR Hubble and Adaptive Optics Imaging: Remote Sensing 1518 6-14  
Doi : 10.3390/rs14061518
- Arjuna James, Patrick G. J Irwin, Jack Dobinson, Michael H. Wong, Troy K. Tsubota, Amy A. Simon, Leigh N. Fletcher, Michael T. Roman, Nick A. Teanby, Daniel Toledo, and Glenn S. Orton (2023), The Temporal Brightening of Uranus' Northern Polar Hood From HST/WFC3 and HST/STIS Observations: Journal of Geophysical Research: Planets (128) Doi: 10.1029/2023JE007904
- Takayuki Arasaki, Yuji Ikeda, Yoshiharu Shinnaka, Chisato Itose, Akika Nakamichi, and Hideo Kawakita (2015), The Very Precise Echelle SpectroPolarimeter on the Aaraki telescope(VESPoA) Astron Soc. Japan 67 (2015) 1-19 doi 10.1093/pasj/psv004
- Daniel Toledo, Patrick G.J.Irwin,Nicholas A.Teanby, Amy A. Siomon, Michael H.Wong, and Glenn S. Orton (2018), Uranus's Northern Polar Cap in 2014, Geophysical Research Letters 45,5329-5335, doi: 10.1029/2018GL077654
- Daniel Toledo, Patrick G.J. Irwin Pascal Rannou, Nicholas A. Teanby, Amy A. Simon, Michael H. Wong, Glenn S. Orton (2019), Constraints on Uranus's haze structure, formation and transport Icarus 333(2019) 1-11 doi:10.1016/2019.05.018
- Deniz Soyuer, Benno Neuenschwander, and Ravit Helled (2022), Zonal Winds of Uranus and Neptune: Gravitational Harmonics, Dynamic Self-gravity, Shape and Rotation doi: 10.3847/1538-3881/aca08d

- Erich Karkoschka (1994), Spectrophotometry of Jovian Planets and Titan at 300-to 1100 nm Wavelength: The Methane Spectrum *Icarus* 111(1994) 174-192 doi:10.1006/icar.1994.1139
  
- Erich Karkoschka (1998), Methane, Ammonia, and Temperature Measurements of the Jovian Planets and Titan from CCD-Spectrophotometry, *Icarus* 133, 134-146 doi:10.1006/icar.1998.5913
  
- Greenwood, D. P., (1977), Bandwidth specification for adaptive optics systems *Journal of the Optical Society of America*(67) 390-393 Doi: 10.1364/JOSA.67.000390
  
- H.B.Hammel, G. W. Lockwood (2007), Long-term atmospheric variability on Uranus and Neptune *Icarus* 186(2007) 291-301 doi:10.1016/j.icarus.2006.08.027
  
- Jonathan I.Lunie (1993), The Atmospheres of Uranus and Neptune *Annu.Rev.Astron.Astrophys* 1993ARA&A..31..217L
  
- Imke De Pater, L.A.Sromovsky, P.M.Fry, Heidi B.Hammel, Christoph Baranec, and Kunio Sayanagi (2015), Record-Breaking Storm Activity on Uranus *Icarus* 252 (2015) 121–128, doi:10.1016/12.925292
  
- L.A.Sromovsky, E. Karkoschka, P. M. Fry, I, De. Pater and H. B. Hammel (2019), The Methane Distribution and Polar Brightening on Uranus Based on HST/STIS, Keck/NIRC2 and IRTF/SPEX Observations Through 2015 *Icarus* 317 (2018) 266-306 Doi: 10.1016/j.icarus.2018.06.026
  
- L.A.Sromovsky, P.M.Fry, Imke De Pater and Heidi B.Hammel (2024), The puzzling north polar region of Uranus: Continued zero-shear winds and increasing brightness from 2015 through 2022 according to 7 years of Keck AO imaging *Icarus* 420(2024) 116-186 doi: 10.1016/j.icarus.2024.116186
  
- Makoto Watanabe, Yukihiro Takahashi, Mitsuteru Sato, Shigeto Watanabe, Tetsuya Fukuhara, Ko Hamamoto, and Akihito Ozaki (2011), MSI: a visible multi-spectral imager for 1.6-m telescope of Hokkaido University *SPIE8446 Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV* 84462O (2012) doi: 10.1117/12.925292
  
- 今井正堯 (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 P19-21

・合田雄哉 (2014) ピリカ望遠鏡による木星極域における成層圏ヘイズ波構造の見積もり P8-10

・気象庁 過去の観測データ アメダス設置点：名寄  
[https://www.jma.go.jp/bosai/amedas/#area\\_type=offices&area\\_code=012000&amdn=12181&format=table1h&elems=53410](https://www.jma.go.jp/bosai/amedas/#area_type=offices&area_code=012000&amdn=12181&format=table1h&elems=53410)