

# 天王星大気の雲構造と季節変化

—ピリカ望遠鏡による多波長撮像観測—

学籍番号 22080195

仲本 純平

指導教員： 渡部 重十 教授  
惑星宇宙グループ

2013年1月31日

## 概要

天王星は黄道面に対して自転軸が98°傾いた惑星である。そのため公転に伴い昼夜の比率が大きく変化し、これは大気構造の季節変化の要因になる。実際に観測によって天王星大気の高緯度によるアルベドの違いが変化する様子が捉えられている。[Irwin et al., 2012] また、メタン吸収波長 (730nm など) を中心とする複数の波長を用いることでメタン吸収の違いから異なる深さの大気を観測することが出来る。[Karkoschka and Tomasko, 2009] しかし観測数の不足から天王星大気の高緯度による季節変化の3次元構造は解明されていない。本研究では天王星大気の高緯度による季節変化の大気の高緯度による時定数の差異を解明することを目的とし、2012年07-12月の期間で北大ピリカ望遠鏡に搭載されたマルチスペクトルイメージャを用いメタン吸収波長を含む複数波長で天王星の連続撮像観測を行った。解析したデータからは、天王星の高緯度によるアルベドの違いを捉えることができた。今後、更に解析を進め、時間変動を検出を図る。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>2</b>
1.1	天王星の概観 . . . . .	2
1.1.1	諸元 . . . . .	2
1.1.2	大気・雲 . . . . .	4
1.1.3	季節変化 . . . . .	7
1.2	研究目的 . . . . .	7
<b>第2章</b>	<b>装置</b>	<b>10</b>
2.1	北海道大学大学院理学研究院附属天文台（北海道名寄市） . . . . .	10
2.2	1.6m プリカ望遠鏡 . . . . .	11
2.3	MSI(Multi-Spectrum Imager) . . . . .	12
<b>第3章</b>	<b>観測</b>	<b>15</b>
3.1	観測方法 . . . . .	15
3.2	観測期間 . . . . .	16
<b>第4章</b>	<b>解析方法</b>	<b>17</b>
4.1	一次処理 . . . . .	17
4.2	表面模様の検出 . . . . .	17
<b>第5章</b>	<b>解析結果</b>	<b>20</b>
<b>第6章</b>	<b>考察</b>	<b>21</b>
<b>第7章</b>	<b>まとめ</b>	<b>22</b>

# 第1章 はじめに

## 1.1 天王星の概観

### 1.1.1 諸元

天王星は太陽から7番目の位置を回る木星型惑星である。内部構造の違いから、海王星とともに天王星型惑星と分類されることもある。軌道長半径は19.2AU、公転周期は84年である。探査機による天王星についての直接観測は過去において1986年1月24日のVoyager 2のフライバイ観測のみである(図:1.1)。天王星の諸元を(表:1.1)にまとめた。他の惑星にない天王星の大きな特徴として、自転軸の黄道面に対する大きな傾きがある。天王星の赤道傾斜角は $97.9^\circ$ で、ほとんど横倒しで公転している。地球の赤道傾斜角は $24.5^\circ$ で、この傾きによって緯度ごとの日射量が公転の位相によって変化するので、地球には季節がある。天王星の場合にはこの日射量の変化が極端である。(図:1.2)に示すように、南北どちらかの半球にのみ太陽光が当たる状態が数十年続く。更に、他のガス惑星は内部熱源が太陽輻射と同程度あるが、天王星には内部熱源がほとんど存在しないと考えられている。そのため、大気運動は太陽輻射の影響をより強く受けると考えられる。このことから、天王星には大きな季節変化があることが予想される。

表 1.1: 天王星の諸元 (Planetary Sciences[1])

軌道長半径 (AU)	19.19
公転周期	83.7 yr
自転周期	17.24 h
赤道傾斜角	97.86
赤道半径	25559 km = 4.0 $R_{\oplus}$
質量	$86.832 \times 10^{27} g = 14.5 M_{\oplus}$
密度	$1.318 g cm^{-3}$
気温 (p=1bar)	53 K

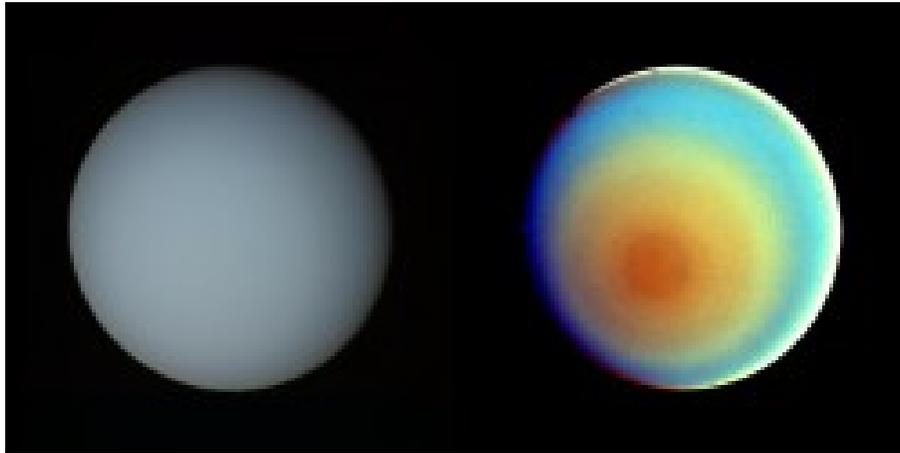


図 1.1: 左:Voyager 2 によって撮影された天王星の大気 右:コントラストを強調する画像処理をしたもの

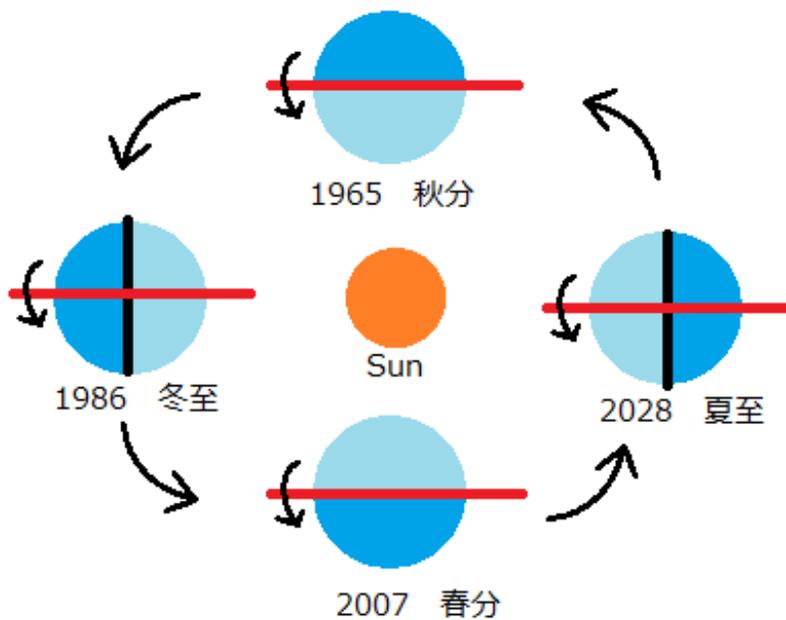


図 1.2: 地軸の向きと太陽との位置関係

天王星の地軸が太陽の方向を向いている時期(夏至, 冬至)では片方の半球に太陽光が当たり続け, 反対の半球は闇の中である. 天王星の地軸が太陽に対し平行な時期(春分, 秋分)では, 他の惑星と同じようにどの緯度でも自転ごとに昼と夜が来る.

## 1.1.2 大気・雲

### 雲層構造

天王星の大気は主に水素とヘリウムで構成されていて、加えて2%程のメタンを含む。雲層構造モデルによると、1-2bar 近辺に  $\text{CH}_4$  氷の雲があると考えられている (図:1.3)。Voyager2 の画像 (図:1.1) でもわかるように帯状構造が見られる。

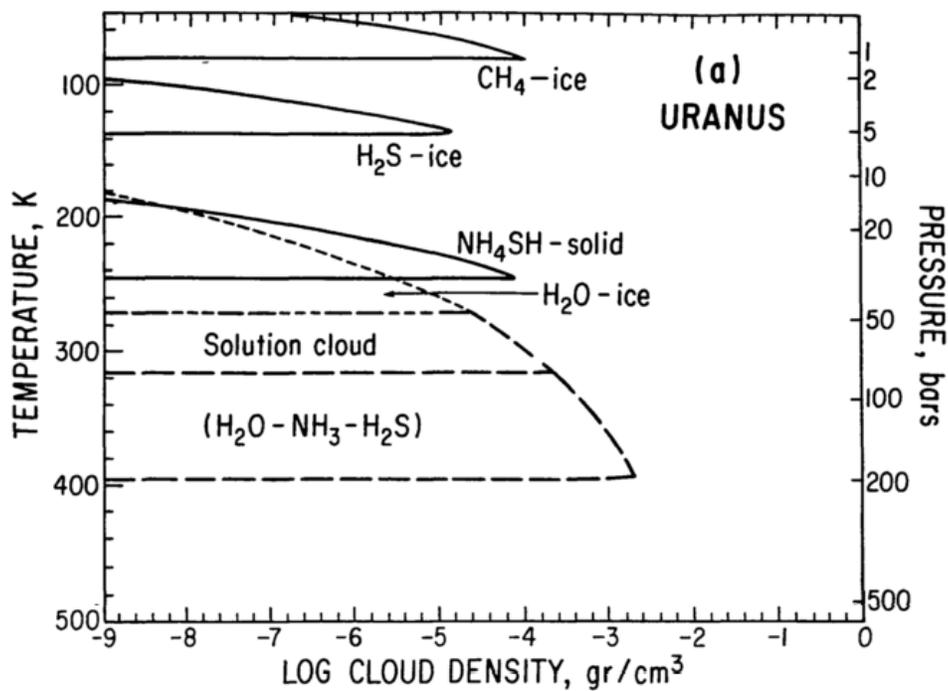


図 1.3: 天王星雲層構造モデル

1-2bar 近辺に  $\text{CH}_4$  氷の雲がある。可視光観測ではこの雲が見える

## 分光観測

天王星のアルベドのスペクトルを(図:1.4)に示した. メタンの吸収の強い影響を受けていることがわかる. 観測する波長を変えると吸収の強さが変わるので, 多波長で観測すると大気雲構造の3次元分布を知ることができる.(Karkoschka and Tomasko, 2009[9])は, ハッブル望遠鏡による2002年の分光観測から波長によるアルベド分布の違いを検出し, 天王星の大気・雲構造についてモデル計算との比較を行なっている.

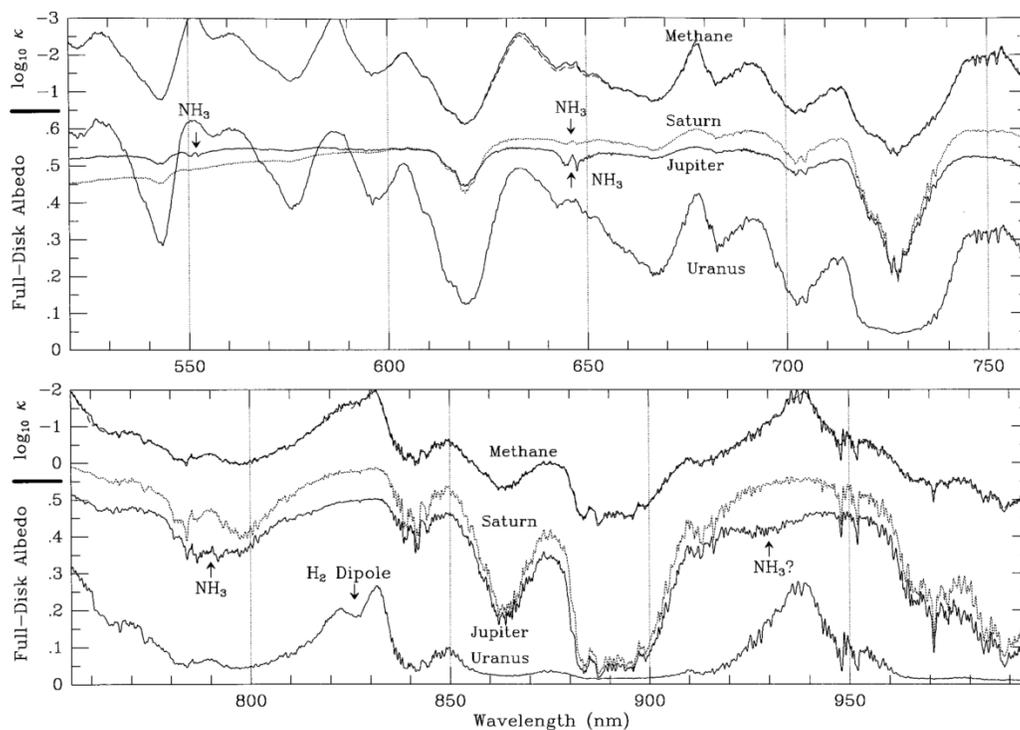


図 1.4: 全球スペクトル (Karkoschka, E. 1998[8])

天王星及びその他ガス惑星の全球スペクトル. 天王星は木星, 土星と比べてメタンによる吸収が深い. これは, 天王星の大気が木星や土星と比べ透明 (他の散乱, 吸収が少ない) ので, 大気より深くで反射した光が帰ってくるため, メタンの吸収が深くなるためである.

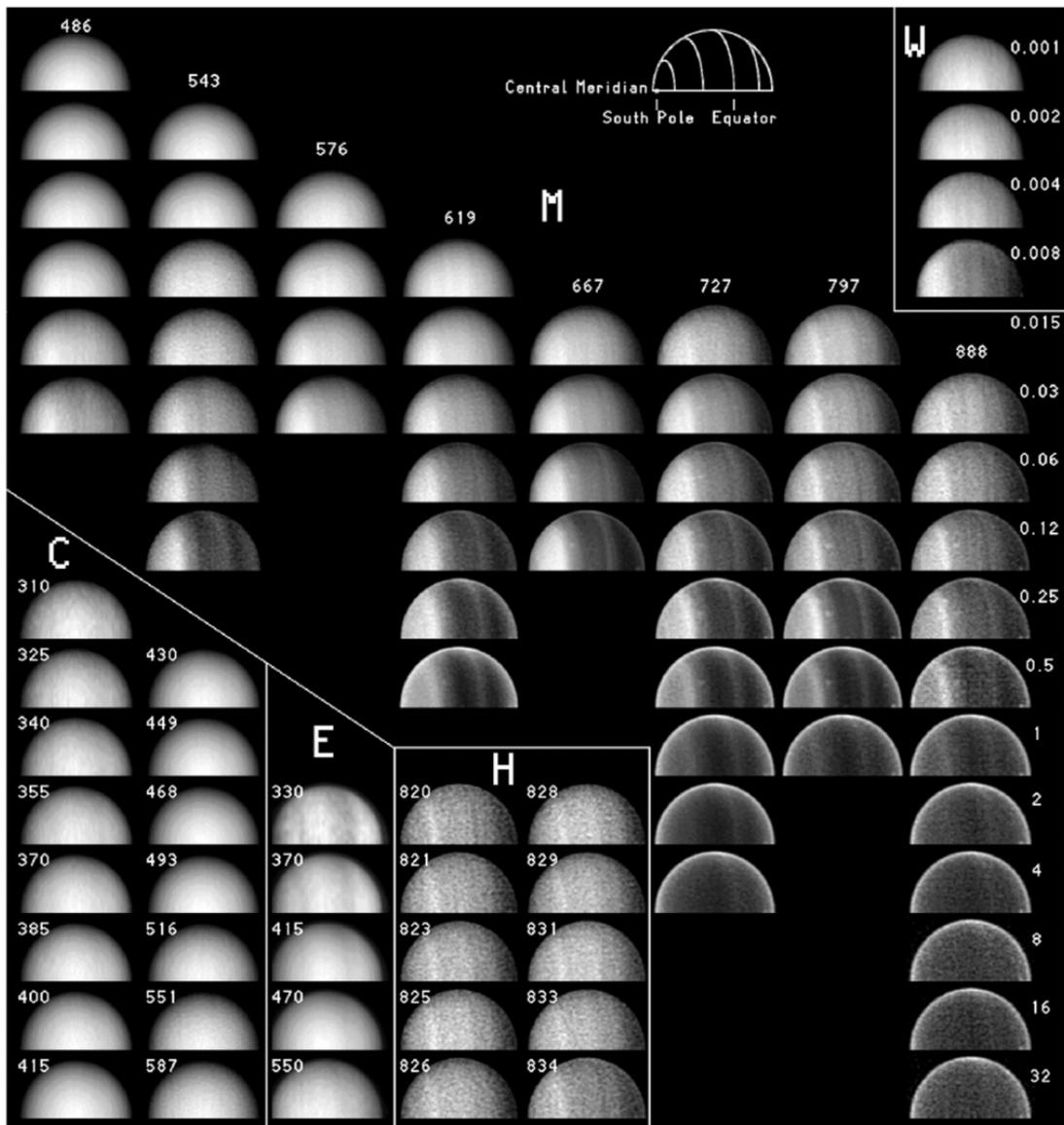


図 1.5: HST/STIS による多波長観測 (Karkoschka and Tomasko, 2009[9])  
 ハッブル宇宙望遠鏡の分光器による多波長観測. 図中で M とキャプションされた画像はメタンによる吸収を示す. メタン吸収のバンドごとに分類されていて, 中心波長が3桁の数字 (nm) で示されている. 下に行くほどメタン吸収の深い波長で, 上に行くほど中心波長から離れて連続体に近くなる. メタン吸収係数が図中右側に示されている. W はごく弱いメタン吸収, C は連続体, E はその他特徴的な模様, H は水素による吸収を示している.

### 1.1.3 季節変化

天王星の全球光度の変動について 1950 年代から現在までの長期の観測データから, (Hammel and Lockwood, 2007[6]) は, 過去の秋分点及び夏至点で大気構造に物理的な変化が生じたと結論づけている. そして同様の変化が 2007 年の春分点前後にも生じると予測している.

また, (Irwin et al., 2012[?, ?]) 地上望遠鏡による赤外観測から, 緯度ごとのアルベドの分布が年変化していくことを突き止めている (図:1.6). これによると, 春分点 (2007 年) 以前は南半球が明るく, 北半球が暗い状態だったものが, 春分点を超えてだんだんと南北のアルベド分布が対称になっていく様子がわかる. 将来的には南北が反転し, 北半球のアルベドが高く南半球のアルベドが低い状態になると Irwin et al. 2012 は考察している.

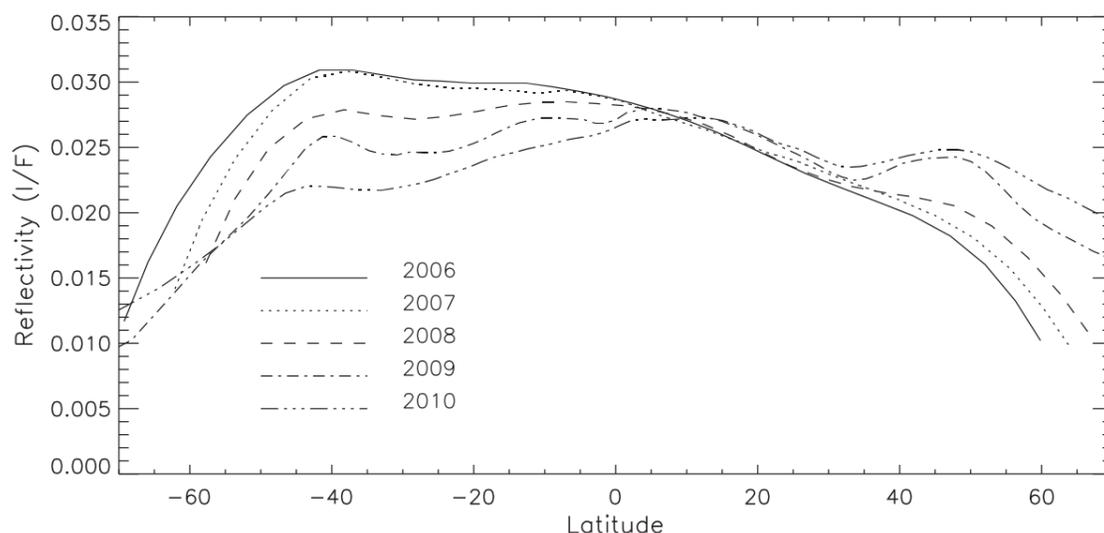


図 1.6: 緯度による反射率の違いの年変化:UKIRT3.8m 赤外望遠鏡及び Gemini-North8m 望遠鏡による赤外 ( $\sim 1.6\mu\text{m}$ ) 観測.(Irwin et al., 2012[7])

図中右が北極側であり, 2006-2010 年にかけてのこの期間で, だんだんと太陽光が当たり始めた半球である.

## 1.2 研究目的

天王星は自転軸が横倒しの状態で公転することで知られ, そのため太陽輻射の大きな季節変化がある. 実際に 2007 年の春分点前後で大気の季節変動が観測されている. しかし大型望遠鏡はマシンタイムの制約により多波長撮像観測の頻度は高くない. そ

ここで惑星優先であるプリカ望遠鏡を用いることで,他に類を見ないタイムスケールの多波長撮像観測を行う.多波長での観測を行うことで高度によるの季節変化の違いを探る.

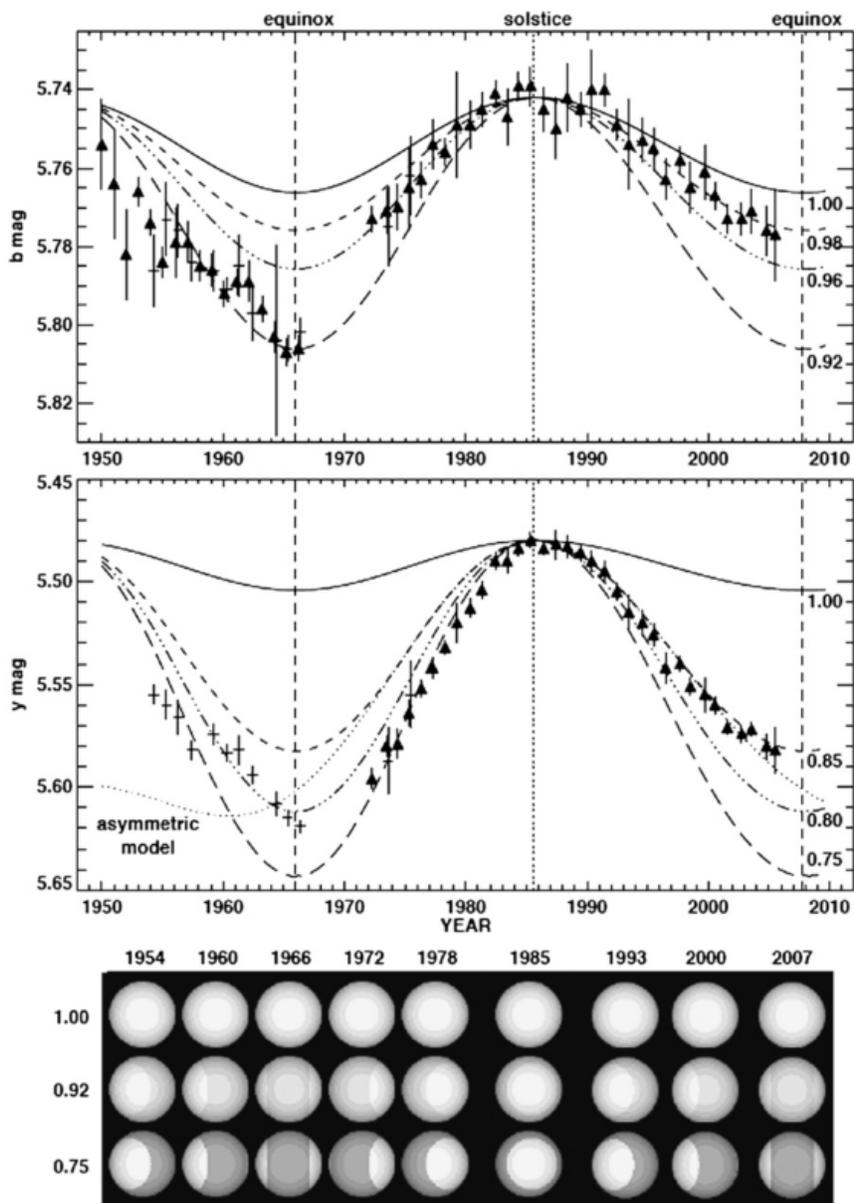


図 1.7: 全球光度の年変化

bバンド(上),yバンド(下)におけるの測光結果の年変化である. 至点, 分点の前後でバンド構造のコントラストが変化していてこれは天王星雲構造の物理的な変化によるものだと Hammel and Lockwood 2007 では考察されている.

## 第2章 装置

この章では本研究に用いた観測装置について記す。

### 2.1 北海道大学大学院理学研究院附属天文台（北海道名寄市）

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設置されている。名寄市は札幌から北へ約220kmの距離に位置し、車でおよそ3時間とアクセスにも優れている。観測条件としては梅雨が無いこと、大気揺らぎによる星像のボケの大きさを表すシーイングが中央値で1.8秒角と日本国内としては比較的良い値であることなど優れている。天文台は市街地から離れた高台に建設されており、望遠鏡の標高は151mである。(図:2.1) 天文台の建物は名寄市が名寄市率天文台として建設し、プラネタリウムなどを備え公共天文台として市民に開かれている。また1.6mピリカ望遠鏡は学生の教育・研究目的の他に一般公開もなされている。



図 2.1: 天文台の外観

## 2.2 1.6m プリカ望遠鏡

プリカ望遠鏡は北海道大学が所有する口径 1.6m の光学望遠鏡である。(図:2.2) 惑星観測優先望遠鏡として設置され, この用途に資するの光学望遠鏡としては世界最大級の口径を持っている. また, 日本国内に設置された光学望遠鏡としては 3 番目の大きさである. プリカ望遠鏡はカセグレン焦点と 2 つのナスミス焦点を持ち, 複数の観測機器が取り付けられている.(表:2.1) にプリカ望遠鏡の仕様を示す.

表 2.1: プリカ望遠鏡の仕様

項目	仕様
サイト	E142 38 N44 22 151m
形式	リッチークレチアン
有効口径	1600mm
合成焦点距離	19238 mm (f/12.6)
焦点	カセグレン ×1, ナスミス ×2



図 2.2: 1.6m プリカ望遠鏡

## 2.3 MSI(Multi-Spectrum Imager)

プリカ望遠鏡のカセグレン焦点に搭載された装置の一つとして,MSI(Multi-Spectral Imager)がある(図:2.3).これは可視近赤外域の撮像装置で,ユニークな点として液晶波長可変フィルター(LCTF:Liquid Crystal Tunable Filter)を搭載している.このLCTFは印加電圧を変化させることで中心波長を任意に変更することのできる狭帯域(半値幅 $\sim 10\text{nm}$ )フィルターで,分光撮像をすることができる.MSIにはこのフィルターが可視光(400-720nm)用と近赤外(650-1100nm)用の2台搭載されている.それぞれのフィルターの波長範囲の中で中心波長を高速( $\sim 100\text{ms}$ )で変更できる.それぞれのフィルターの透過特性は(図:2.4)のようになっている.MSIに搭載されたCCDは $512 \times 512\text{pixel}$ であり,1pixelは $0.389''$ である.これは天王星の視直径を10分割する.MSIの詳細仕様を(表:2.2)に示した.



図 2.3: MSI の外観

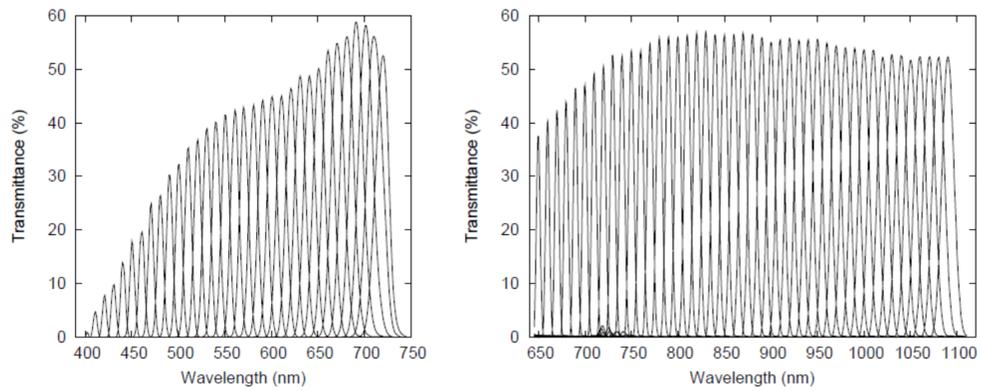


図 2.4: LCTF の透過特性

表 2.2: MSI の仕様 [2]

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 U,B, V,R, 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, -65C
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

## 第3章 観測

観測は,2012年07-12月の期間にピリカ望遠鏡を用いて行った.

### 3.1 観測方法

LCTFの中心波長を連続的に切り替えながら撮像することで波長方向に連続したデータを取得する. まず天王星のアルベドのスペクトルについてMSI(Multi Spectrum Imager)の波長分解能で観測する場合にどれほどのを用いて幾つかのメタンバンド(図:3.1 着色部)を観測する. 連続的に観測し,時間変化を追う.

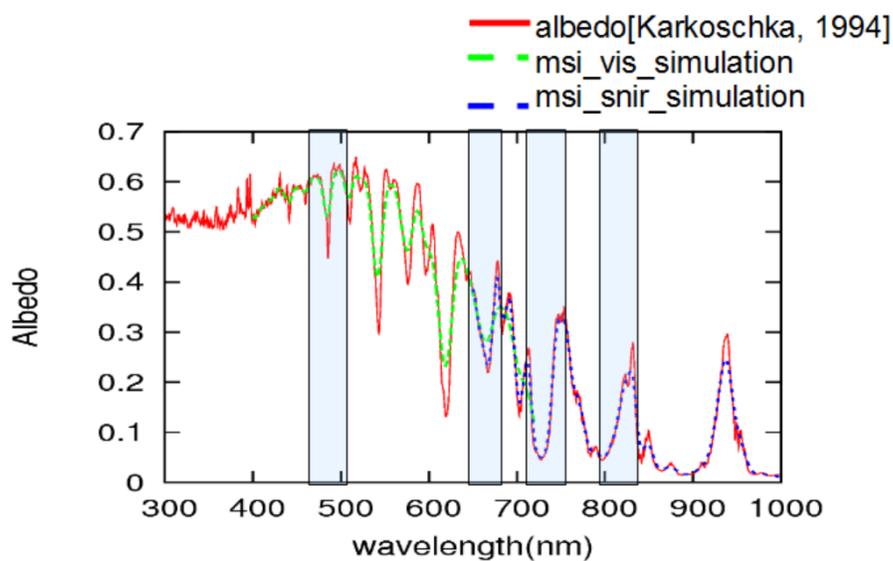


図 3.1: 観測した波長域

表 3.1: 観測期間

Date	time	シーイング	観測波長 (nm)	波長数	セット数
2012/07/15	25:33-27:48	3.3 ”	650-1000	94	3
2012/08/14	25:41-27:11	2.7 ”	650-1000	94	6
2012/08/18	24:58-26:38	1.4 ”	450-1000	144	2
2012/09/12	24:32-24:42	1.9 ”	460-500,650-680, 710-750,790-840	76	1
2012/09/13	24:31-27:45	1.4 ”	460-500,650-680, 710-750,790-840	69	12
2012/09/14	23:42-27:26	2.1 ”	460-500,650-680, 710-750,790-840	69	13
2012/10/01	21:30-26:07	2.6 ”	460-500,650-680, 710-750,790-840	69	4
2012/10/02	19:13-23:08	2.8 ”	460-500,650-680, 710-750,790-840	69	9
2012/10/05	21:16-22:15	2.9 ”	460-500,650-680, 710-750,790-840	69	3
2012/10/06	20:43-25:16	3.6 ”	460-500,650-680, 710-750,790-840	69	5
2012/10/07	21:23-25:20	3.2 ”	460-500,650-680, 710-750,790-840	69	5
2012/12/03	16:35-20:18	2.0 ”	460-500,650-680, 710-750,790-840	69	4

### 3.2 観測期間

今回の観測期間のうち、撮像に成功した観測について、観測日時・シーイング・設定した観測波長・観測波長域を何種類の波長で分割したか・何セット観測できたかを(表:3.1)にまとめた。

## 第4章 解析方法

### 4.1 一次処理

取得した画像にまず一次処理を施す。本観測では天王星以外に、バイアスとフラットも取得している。これらは観測フレーム内の天体の情報以外に含まれているものを取り除くために使われる。

バイアスフレームとは、光が入らない状態にした CCD の露出時間ゼロ秒の時のカウント値で、これを差し引くことで明るさのゼロ点が補正される。フィルターホイールを閉じ、露出時間を最短にして取得したフレームを 10 枚平均化することで取得した。

フラットフレームとは、画像内の感度ムラを反映するフレームで、本観測ではドーム内のスクリーンを一様な明るさに照らし、それを観測することで取得した。

さらに地球大気に由来する背景光を取り除くため、バイアス補正、フラット補正が完了した画像について、今回は天王星中心から半径 50pixel(天王星半径の 10 倍程度)の領域を取り除いた上で全体のメディアンを取得し、これをスカイとしている。

これらを以下のように組み合わせ、生データから天体の信号のみを取り出している。

$$(\text{Reducedflame}) = \frac{(\text{Rawflame}) - (\text{Biasflame})}{(\text{Flatflame}) - (\text{Biasflame})} - (\text{Sky})$$

### 4.2 表面模様を検出

2012年12月03日に取得し、一次処理を施した天王星の画像の一部を(図:4.1,4.1,4.1)に示す。

この3枚はそれぞれ745nm,739nm,727nmで撮影したもので、メタン吸収のない連続体、弱いメタン吸収、強いメタン吸収に対応する。

この画像のままでは天王星大気の詳細構造がわからないので、周辺減光およびシーイングによる影響を取り除くために、連続体画像(745nm)で他の画像を除算することで表面模様のコントラスト向上を試みた。

$$\frac{\text{Image}}{\text{Image}(745\text{nmcontinuum})} = \text{HicontrastImage}$$

この処理を行うことで連続体画像に対する比として表面模様を表現することができる。そのうえで、天王星中心から上下4pixelの合計9pixelの幅(~天王星視直径)で

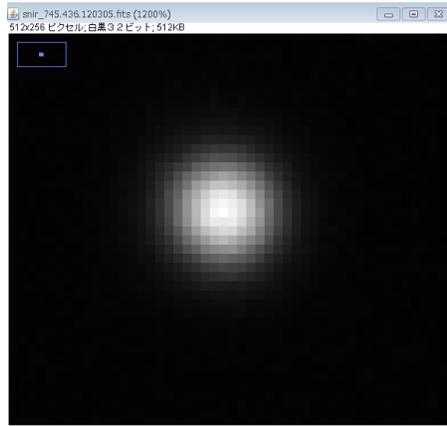


図 4.1: 745nm:連続体

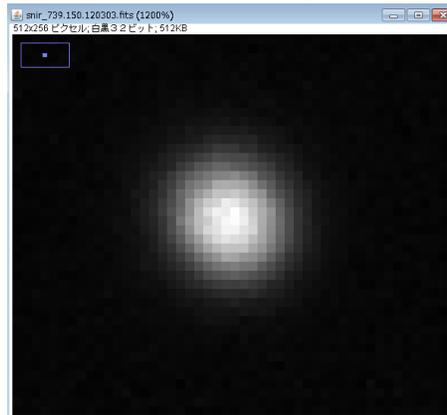


図 4.2: 739nm:弱いメタン吸収

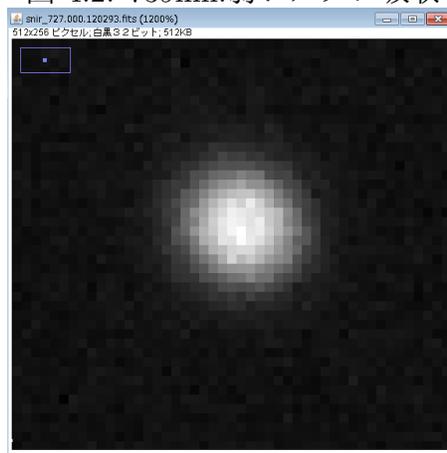


図 4.3: 727nm:強いメタン吸収

Y軸方向(天王星の経度方向に対応)にカウント値を積分し,X軸方向(天王星の緯度方向に対応)にプロットした.これを観測した複数波長それぞれについて行い,波長ごとに観測される表面模様の違いを検出する.

## 第5章 解析結果

2012年12月03日の観測結果を解析したものを,(図:5.1)に示す.

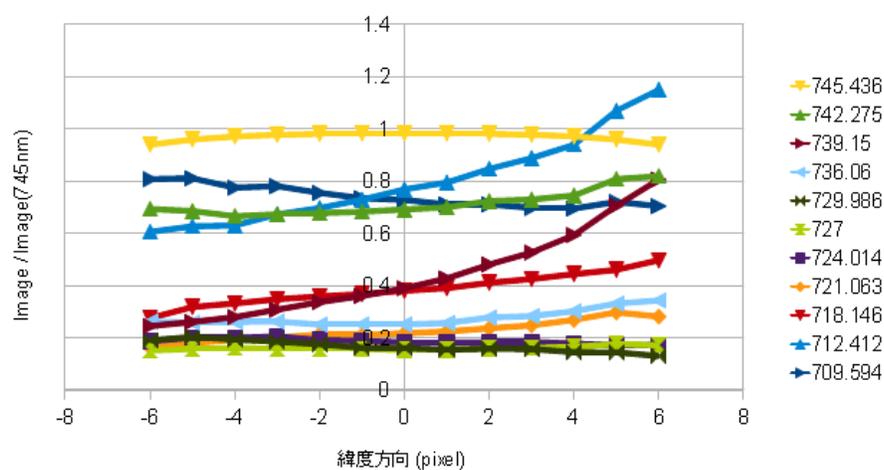


図 5.1: 緯度方向の明暗比

この図は横軸に天王星中心を0とした pixel 座標をとる. 正の方向が画像右方向で, 天王星の南極側に対応し, 負の方向が天王星の北極側に対応している. 縦軸に 745nm の画像とのカウント値の比を示している. 値が大きいほど明るい. この図によると, 712nm, 713nm において顕著な傾きがある.

## 第6章 考察

今回解析した画像からは、波長による緯度方向のアルベド分布の違いを検出することができた。北半球側に比べ南半球側が明るいという結果は (Irwin et al., 2012[?, ?]) の予測とは矛盾する。これが観測条件の違い (観測波長が可視 vs 赤外であること) による本質的なものであるかどうかを明確にするためには、さらなる解析でより確かな空間分布情報を得る必要がある。現在の解析手法では波長によって画像上の天王星の位置がずれる効果を考慮していない。視直径の小さな天王星の観測においてはこれが無視できない可能性があるため、正確な画像間の位置合わせの方法を検討する必要がある。これには対象と同一画像上に写った点光源を基準にする方法が考えられる。そのためには恒星か衛星が検出される必要があるが、天王星の光度 (5-6 等) に匹敵する光度を持つ恒星が近傍を通過することは稀であるため、今回観測した画像からはそのような恒星を見出すことができなかった。

## 第7章 まとめ

本研究では天王星大気構造の季節変化の高時間分解能・光波長分解能なデータの取得を目的として2012年07月から2012年12月にかけておよそ1ヶ月おきに北海道大学1.6mピリカ望遠鏡を用い分光撮像観測を行った。観測結果からは南北でアルベドに差があることを示す解析結果が出た。今後、全日程分のデータ解析を進め、解析の精度向上、時間変化の検出を進めていきたい。

# 謝辞

この論文を製作するに当たり、多くの方々にお世話になりました。

渡部重十教授には研究のアイデアや論文・発表指導など、様々な点で優しいご指導をいただきました。

高橋幸弘教授には観測や研究に取り組む姿勢や多くのことを教えていただきました。

渡辺誠特任助教には観測の方法やデータ処理など、たくさんのご意見をいただきました。

名寄市立天文台の職員の皆さまには天文台での観測期間中、色々と手助けをしていただきました。

そして惑星宇宙グループの皆さまには論文の添削から研究室生活まで、日々大変お世話になりました。

今日までの日々を陰日向になって助けてくださったすべての方々に、この場をお借りしてお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] de Pater I. and Lissauer J.J. (2010), Planetary Sciences second edition, Cambridge University Press
- [2] M. Watanabe, Y. Takahashi, M. Sato, S. Watanabe, T. Fukuhara, K. Hamamoto, A. Ozakia (2012), "MSI: a visible multispectral imager for 1.6-m telescope of Hokkaido University", Proc. SPIE 8446, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, 84462O (October 5, 2012);
- [3] J.T. Bergstrahl, E. D. Miner, M. S. Matherws, editors, (1991), Uranus, The University of Arizona Press
- [4] 渡部潤一, 井田茂, 佐々木晶, 編 (2008), 現代の天文学 太陽系と惑星, 日本評論社
- [5] 松井孝典, 永原浩子, 藤原顕, 渡部誠一郎, 井田茂, 阿部豊, 中村正人, 小松吾郎, 山本哲生 著 (2011), 新装版 地球惑星科学 12 比較惑星学, 岩波書店
- [6] Hammel, H. B., and G. W. Lockwood (2007), Long-term atmospheric variability on Uranus and Neptune, *Icarus*, 186(1), 291—301.
- [7] Irwin, P. G. J., et al. (2012), Further seasonal changes in Uranus' cloud structure observed by Gemini-North and UKIRT, *Icarus*, 218(1), 47—55.
- [8] Karkoschka, E. (1998), Methane, ammonia, and temperature measurements of the jovian planets and Titan from CCD-spectrophotometry, *Icarus*, 133, 134—146.
- [9] Karkoschka, E., and M. Tomasko (2009), The haze and methane distributions on Uranus from HST-STIS spectroscopy, *Icarus*, 202(1), 287—309.