天王星アルベドの季節変化に関する研究

岡山大学 大学院自然科学研究科 41425511 戸田 晃太

2015/02/13

要旨

天王星アルベドには季節変化があり、これは天王星の自転軸が公転面に対しほど横倒しに倒れていることに起因すると考えられている。天王星アルベドの季節変化について先行研究が行われているが、 天王星の 1 公転周期分の期間の観測は行われておらず、天王星アルベドの変動に南北の非対称があるかどうかといった変動の詳細はまだ十分に明らかとなっていない。

天王星アルベドの変動を明らかにするためには、現在の天王星の光度の絶対値を決定する必要がある.本研究では望遠鏡と CCD カメラを 2 セット用意して天王星と標準星の同時観測を行い、標準星に対する相対的な天王星の明るさを測定することで、天王星の光度の絶対値を決定した。

本研究で決定した天王星の光度は先行研究から予想される光度とおおむね整合的であった.一方で、 アルベドの季節変化を議論するに足る精度を達成することはできなかった.

目次

1.序	論	1
	1.1 天王星	1
	1.2 天王星アルベド	1
	1.3 本研究	2
2 絈	対測光	3
	2.1 天王星の光度の絶対値の決定	_
	2.2 標準星	
3.天	王星の明るさの補正	4
	3.1 天王星の明るさの補正	4
	3.2 補正方法	4
4.大	気減光	6
	4.1 大気減光	6
5.観	測	7
	5.1 観測	7
	5.2 光学系	7
	5.3 検出器	8
	5.3.1 SBIG STL-1001E	9
	5.3.2 SBIG ST·i	9
	5.4 2013 年の観測	9
	5.5 2014 年の観測	10
	5.5.1 9月 19日~9月 26日の観測	10
	5.5.2 10 月 23 日~10 月 29 日の観測	10
	5.5.3 11 月 22 日~11 月 28 日の観測	10
	5.6 2013 年と 2014 年の観測の違い	11
6.解	析	12
	6.1 解析	12
	6.2 一次処理	12
	6.2.1 ダーク引き	12
	6.2.2 フラット割り	13
	6.3 測光	13

6.4 明るさの換算	14
6.5 天王星の光度の決定	15
6.5.1 標準星に対する天王星の相対的な明るさ	15
6.5.2 光度の決定	17
7.観測結果	18
7.1 2013 年の観測結果	18
7.1.1 10 月 29 日	18
7.1.2 11 月 1 日	19
7.1.3 11 月 10 日	20
7.1.4 11 月 11 日	21
7.1.5 11 月 26 日	22
7.1.6 11 月 28 日	23
7.1.7 11 月 29 日	24
7.2 2014 年の観測結果	25
7.2.1 9 月 20 日	25
7.2.2 9 月 22 日	26
7.2.3 10 月 28 日	27
7.2.4 11 月 27 日	28
8.考察	29
8.1 2013年、2014年の観測結果	
8.2 天王星アルベドの季節変化	
0.2 八工生//* 计少于即及旧	40
9.まとめ	31
9.1 本研究のまとめ	31

1 序論

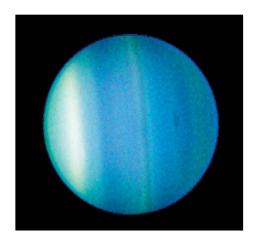
1.1 天王星

天王星の赤道半径は 25559km で、太陽系の惑星の中で 3 番目に大きい惑星である. 軌道長半径は 19.21AU、離心率は 0.046 である. 自転軸傾斜角は 97.9 度である. 公転周期は 84 年、自転周期は 0.718 日である.

1.2 天王星アルベド

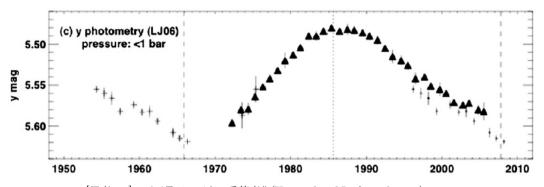
天王星は太陽光を反射して輝いており、その光度は太陽からの距離と反射率(アルベド)によって決まる. アルベドとは、太陽から天体に入射した光の量に対する、天体が反射した光の量のことである. 1950年以降に行われた観測結果をみると(Hammel and Lockwood, 2007)、太陽からの距離の違いを補正した後の天王星の光度は約40年の周期で約0.1等級程度変動している. すなわち、天王星のアルベドは一定でなく変動している.

天王星アルベドの変動は、天王星の自転軸が公転面に対してほぼ横倒しに倒れていることに起因すると考えられている(Hammel and Lockwood, 2007). 天王星のアルベドと太陽に対する自転軸の方向を対比させてみると、極が太陽の方向を向いているときにアルベドは大きくなり、赤道の上に太陽があるときアルベドは小さくなっている. ただし天王星の光度がそれなりの精度で観測されている期間はまだ天王星の1公転周期(84年)に達しておらず、太陽に対する自転軸の方向だけでアルベドの変動が説明されるのかどうかは明らかでなく、また天王星のアルベド変動に南北の非対称があるかどうかといった変動の詳細も明らかとなっていない.



影した天王星 太陽の光を反射して全体的に青く光っている. (http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/gallery/Hubble_Uranus.jpg から引用)

[写真 1-1] 2006年にハッブル宇宙望遠鏡が撮



[写真 1-1] 天王星アルベドの季節変化(Hammel and Lockwood, 2007) 縦軸は y フィルターで見た天王星の光度. 太陽からの距離を補正している。その距離は $19.191 \mathrm{AU}$ である.

1.3 本研究

星空公園 60cm 反射望遠鏡を用いて天王星の測光をおこなう手法を構築し、実際に天王星の光度の 絶対値を観測して求めた. 測光手法の構築にあたっては、天王星光度の季節変化に起因する変動の大 きさが 0.1 等級程度であることを鑑み、測光の誤差を 0.01 等級以下にすることを目標とした.

2 絶対測光

2.1 天王星の光度の絶対値の決定

本研究ではすでに光度の絶対値が測定されている標準星を利用して天王星の光度を決定した.

観測では標準星に対する天王星の相対的な明るさを測定し、文献にある標準星の光度を用いて天王星の光度を決定した.星の相対的な明るさを測定することを相対測光という.相対測光は絶対測光に比べ大気減光の影響を受けにくく、精密な測光をおこなうのに適している.

2.2 標準星

標準星とは光度が測定されている恒星のことで、明るさの変動が小さい恒星が選ばれている. 本研究では Landolt 標準星(http://james.as.arizona.edu/~psmith/61inch/ATLAS/tableA.html)を使用した. Landolt 標準星は $9\sim15$ 等星の恒星が約 500 個選ばれており、ほとんどは天の赤道に沿って分布している. V、B、R、IR、U のフィルターを通したときの光度が測定されている.

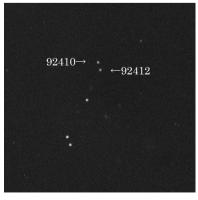
本研究では観測日に天王星の近くに位置していた 92410、92412 を使用した. 92410 の位置は赤経 0h 55m 15s、赤緯+1° 1'49"である. 92412 も 92410 とほぼ同じ位置にある. 2013 年 10 月 29 日に天王星は赤経 0h 36m 51s、+3° 2'26"にあった.

標準星 92410 と 92412 は同一視野内に入るので、この 2 つの標準星の明るさを足し合わせたものを標準星の明るさとした. 2 つの標準星を合わせた光度は以下の式で求められる.

$$M_{S} = -2.5 \times \log_{10} \left(10^{\left(\frac{M_{92410}}{-2.5}\right)} + 10^{\left(\frac{M_{92412}}{-2.5}\right)} \right)$$

ここで M_S は 2 つの標準星の明るさを足し合わせた光度、 M_{92410} は標準星 92410 の光度、 M_{92412} は標準星 92412 の光度である. Main Index of Equatorial UBVRAI Photometric Standard Stars による と、92410 と 92412 の V 等級はそれぞれ M_{92410} =15.036、 M_{92412} =14.984 である. 従って M_S は 14.257 となる.





[写真 2-1, 2-2] 左 天王星の写真. 右 標準星の写真. 2013年10月29日撮像. Vフィルターを 使用. 露出時間は天王星が1秒、標準星が 80秒.

3 天王星の明るさの補正

3.1 天王星の明るさの補正

地球から観測する天王星の明るさはアルベドだけでなく、天王星と太陽の距離、天王星と地球の距離、天王星の満ち欠けの度合いによっても変化する. そのためアルベドを議論するためには距離や満ち欠けの影響を補正する必要がある. 本研究は William (1959)の方法に従って、距離と満ち欠けの影響を補正した.

3.2 補正方法

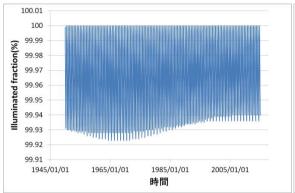
天王星の離心率は 0.046 であり、近日点距離が 18.28AU、遠日点距離が 20.09AU である. 太陽からの距離が変わって天王星に入射する太陽光の量が変わると、天王星の明るさは変わる. また天王星と地球の距離によっても、地球から見た天王星の明るさは変化する.

観測時の太陽と天王星と地球の位置関係によって、地球から見た天王星ディスクのうち太陽光に照らされている部分の割合も変わる。観測者から見た天王星ディスクのうち、太陽光に照らされている部分の全ディスクに対する割合を Illuminated fraction f と呼ぶ。 f=1 は満天王星であり、ディスクの全面が太陽光に照らされた天王星が観測される。 天王星の Illuminated fraction は $99.92 \sim 100\%$ で変化する.

距離の補正、Illuminated fraction の補正は以下の式でおこなった.

$$C_0 = C \times \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 \times \left(\frac{a}{a_0}\right)^2 \times \frac{1}{f}$$

 C_0 は補正後の天王星の明るさ、Cは観測された天王星の明るさ、Dは観測したときの天王星と太陽の距離、Dの距離、D0は基準となる天王星と太陽の距離(19.191AU)、D10は基準となる天王星と地球の距離、D10は基準となる天王星と地球の距離(18.191AU)、D10は基準となる天王星と地球の距離(18.191AU)、D10は Illuminated fraction である。観測時の天王星と太陽の距離、天王星と地球の距離、Illuminated fraction は HORIZONS Web-Interface(http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi)を参考した。



2013/08/01 2013/11/30 2014/04/01 2014/08/01 2014/12/01 時間
の変化
[図 3-2] 2013~2014年の Illuminated fraction の変化
縦軸: Illuminated fraction(%)、横軸:時間. 観測した日

100.01

100

99.99

99.98

99.97

99.96

99.95

99.94

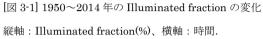
99.93

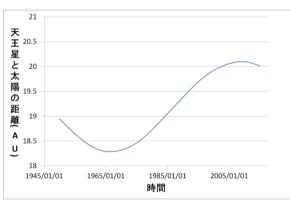
99.92

99 91

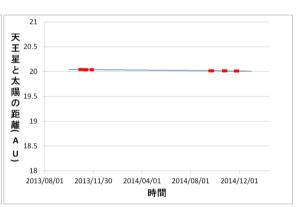
を赤の点で表している.

Illuminated fraction(%)

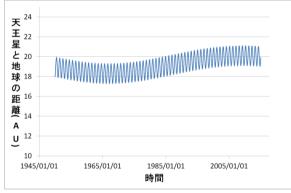




[図 3-3] 1950~2014 年の天王星と太陽の距離の変化 縦軸:天王星と太陽の距離(AU)、横軸:時間.



[図 3-4] 2013~2014年の天王星と太陽の距離の変化 縦軸:天王星と太陽の距離(AU)、横軸:時間. 観測した日 を赤の点で表している.



[図 3-5] 1950~2014 年の天王星と地球の距離の変化 縦軸:天王星と地球の距離(AU)、横軸:時間.



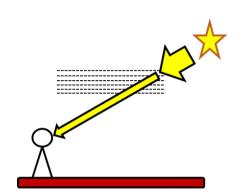
[図 3-6] 2013~2014年の天王星と地球の距離の変化 縦軸:天王星と地球の距離(AU)、横軸:時間. 観測した日 を赤の点で表している.

4 大気減光

4.1 大気減光

地上観測による測光で最も問題となるのが大気減光である.地上で観測される光は大気を通過する際に、その一部が大気に吸収されたり散乱されたりして減光する.これが大気減光である.

大気減光の大きさは大気中の塵や水蒸気の量によって変動する. 塵や水蒸気の量は時間的にも空間 的にも変動しているため、大気減光の影響を補正することは難しい.



[図 4-1] 大気減光の仕組み

点線は大気を表している. 黄色矢印は天体の光量を表している. 天体の光が大気を通過する際、その一部は大気に吸収される. そのため天体の本来の光より少し暗くなった光が地上に届く.

ただし相対測光では、大気減光の影響を受けにくくすることができる. 比較する相手の星が天球上で近くにあり、かつ観測時刻にあまり差がない場合には、対象とする星と比較する星の光がほぼ同じように大気減光の影響を受けるため、大気減光はあってもその相対的な明るさは比較的によく決めることができる.

5 観測

5.1 観測地点

本研究は星空公園で観測を行った。星空公園は井原市美星町大倉龍王山の頂上付近(東経133"34'18、北緯34"40'48、標高538m) に位置している.



[写真 5-1] 星空公園2014年10月29日撮影. 星空公園の観測ドーム.

5.2 光学系

観測には星空公園 60cm 反射望遠鏡、星空公園 屈折望遠鏡、MEADE ETX-105ECJ、KOWA LM100JC を使用した.

各光学系の諸元は表 5-1 にある通りである.



[写真 5-2] 星空公園 60cm 反射望遠鏡 一番大きい望遠鏡が 60cm 反射望遠鏡. 60cm 反射望遠鏡の上にある屈折望遠鏡を 観測に使用した. (http://www.bao.go.jp/hoshizora/参照)



[写真 5-3] MEADE ETX105ECJ [写真 5-4] KOWA LM100JC



[写真 5-4] KOWA LM100JC (http://www.kowa.co.jp/opto/p roducts/2_3jc.htm 参照)

	星空公園 60cm反射望遠鏡	星空公園 屈折望遠鏡	MEADE ETX-105ECJ	KOWA LM100JC
口径	60cm	約15cm	10.5cm	4.2cm
f値	9420mm	不明	1470mm	100mm

[表 5-1] 各光学系の諸元

5.3 検出器

撮像には CCD カメラ SBIG STL-1001E と SBIG ST-i を使用した. 各検出器の諸元は表 5-2 にある通りである.



[写真 5-5] SBIG STL1001E



[写真 5-6] SBIG ST-i

	SBIG STL-1001E	SBIG ST-i
撮像面の 寸法	24.6mm × 24.6mm	4.73mm×3.55mm
フィルター	R,V,B,IR	なし
露出時間	0.12~3600秒	0.001~3600秒
測定できる電子 の最大数	約63000個	約63000個
冷却機能	外気温より最大で -40℃	なし
量子効率	波長500nm~820nm の範囲で50%	波長425nm~525nm の範囲で50%

[表 5·2] 各検出器の諸元 製品情報は株式会社マゼラン CCD カメラ部 門「SBIG ジャパン」のウェブページ (http://www.sbig-japan.com)から引用した.

5.3.1 SBIG STL-1001E

本研究では星空公園 60cm 反射望遠鏡に SBIG STL1001E を取りつけて、天体を観測した. このときの視野角は 0.1495deg である. 視野の計算は以下の式で行った.

$$a = 2\arctan(\frac{d}{2f})$$

ここで a は視野角、d は CCD カメラの撮像面の寸法、f は望遠鏡の f 値である.

5.3.2 SBIG ST-i

光学系は MEADE ETX-105ECJ と LM100JC を使用した.

SBIG ST-i に MEADE ETX-105ECJ を取りつけた場合の視野角は、縦 0.1843deg、横 0.1383deg である. SBIG ST-i に LM100JC を取りつけた場合の視野角は、縦 2.7095deg、横 2.0337deg である.

5.4 2013年の観測

2013年度は10月28日~11月1日、11月8日~11月15日、11月25日~11月29日の計18夜観測を行った. 星空公園60cm 反射望遠鏡にSBIG STL1001Eを取りつけて観測をおこなった. この組み合わせでは天王星と標準星を同一視野に入れることができないため、天王星と標準星を交互に観測し標準星に対する天王星の相対的な明るさを測定した.

V、B、R、IR4 種類のフィルターで観測した. 露出時間は1つの画素に入る電子の数が4万を越えないように $1\sim5$ 秒の間で調整した.

観測の手順は次の通りである。まず天王星を 4 種類のフィルターで観測する。このとき 1 つのフィルターにつき 20 枚ずつ撮像する。その後、標準星を 4 種類のフィルターで観測する。このとき 1 つのフィルターで 5 枚ずつ撮像する。1 夜のうちにこれを繰り返し、最も観測が順調におこなえた日には 4 サイクルの観測をおこなった。



[写真 5-7] 観測の様子 星空公園 60cm 反射望遠鏡に SBIG STL1001E を取りつけて観測.

望遠鏡の下部についているのが CCD カメラ.

5.5 2014年の観測

2014年度は 9 月 19 日 \sim 9 月 26 日、10 月 23 日 \sim 10 月 29 日、11 月 22 日 \sim 11 月 28 日の計 22 夜観測を行った。 フィルターは V のみを使用し、露出時間は 2013 年の観測と同様に調整した。

5.5.1 9月19日~9月26日の観測

星空公園 60cm 反射望遠鏡に SBIG STL-1001E、星空公園屈折望遠鏡に SBIG ST-i を取りつけて 観測した. 両方の望遠鏡で天王星を観測し、その後両方の望遠鏡で標準星を観測することを繰り返した.

望遠鏡、CCDカメラを2セット使用しているため、天王星と標準星を同時に観測したかったのだが、望遠鏡を別々の方向に向けることが困難だったためできなかった.

5.5.2 10月23日~10月29日の観測

星空公園 60cm 反射望遠鏡に SBIG STL-1001E を取りつけ、MEADE ETX-105ECJ に SBIG ST-iを取りつけて観測をおこなった.

観測の手順は次の通りである. 両方の望遠鏡で天王星を約20分間観測する. 次に星空公園60cm 反射望遠鏡で標準星、MEADE ETX-105ECJ で天王星を約1時間半観測した. これを1夜のうちに2サイクルの観測をおこなった.

5.5.3 11月22日~11月28日の観測

星空公園 60cm 反射望遠鏡に SBIG STL-1001E を取りつけ、KOWA LM100JC に SBIG ST-i に取りつけて観測をおこなった。観測の手順は 2014 年 10 月の観測と同じである。



[写真 5-8] 観測の様子(10月) 星空公園 60cm 反射望遠鏡に SBIG STL1001E、MEADE ETX105ECJ に SBGI ST·i を取りつけて観測.



[写真 5-9] 観測の様子(11月)星空公園 60cm 反射望遠鏡に SBIG STL1001E、SBIG ST·i に C マウントレンズを取りつけて観測.

5.6 2013年と2014年の観測の違い

2013年の観測では天王星と標準星を交互に観測したが、2014年(9月の観測は除く)は天王星と標準星を同時に観測した。同時刻に観測することで相対測光の精度がよくなることを期待した。

6 解析

6.1 解析

本研究では解析にはThe Handbook of Astronomical IMAGE PROCESSING (Berry and Burnell, 2005)に付属している AIP4WIN というソフトウェアを主に使用し、撮像した天体の画像を解析した. 他にもすばる画像解析ソフト マカリ(https://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html.ja)を使用した.

6.2 一次処理

ダーク引きとフラット割りについて説明する.

6.2.1 ダーク引き

CCD カメラ内にまったく光を入れずに撮像すれば、理想的には電子が 0 となって欲しい. しかし 実際、まったく光が入らない状態で撮像しても CCD カメラは電子を出力してしまう. これがダーク である. ダークの大きさは画素によって異なるため、測光に当たってはオブジェクトフレームからダークを引く必要がある.

ダークフレームは CCD カメラ内にまったく光を入れない状態で撮像する. ダークは CCD カメラの温度や露出時間によって変化するので、オブジェクトフレームを撮像したときと同じ温度・露出時間で撮像する. 本研究で使用した SBIG STL-1001E は温度制御ができるため、天体を撮像した温度 (-20.42 度)でダークを 100 枚撮像し、各画素について中央値をとってマスターダークフレームを作成した. 一方、SBIG ST-i は温度制御ができないため、オブジェクトフレームを撮像する際にその場でダーク引きをおこなった. 天体を観測する前にダークを一度撮像し、ダークフレームを作る. その後天体を観測するたびにその場でダーク引きをおこなった. ダークフレームは天体の画像を 8 枚撮像するごとに新しく作り直した.



[写真 6-1] ダークフレーム 2013年10月29日に撮影したダークの画像か ら作成したダークフレーム.

6.2.2 フラット割り

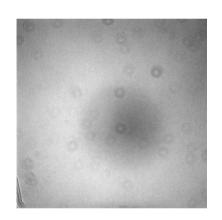
CCD カメラに一様な光を入れてもすべての画素で同じ数の電子を検出するとは限らない.

ひとつは感度にムラがあることである. 画素ごとの量子効率が異なっているため、例えば 10 個の 光子が入ったときに 5 個の電子を検出するものもあれば、15 個の電子を検出するものもある.

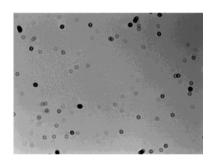
また CCD カメラや望遠鏡のレンズに付着したゴミや光学系の性質によって視野内の明るさが同じにならない.

これらのムラを補正するのがフラット割である. オブジェクトフレームを、望遠鏡に一様な光を入れて撮像した画像(フラットフレーム)で割ることで、ムラの影響を補正する.

フラットフレームは、望遠鏡を天頂に向け薄明を撮像することで得た.露出時間を1秒とし、明け方の薄暗い状態から撮り始め、測定器が飽和するまで撮像する.またフラットを撮像した画像にはダークが含まれているため、オブジェクトフレームにおこなったときと同様に、フラットフレームもダーク引きをおこなった.その後、撮像したフラットフレームの内、星が映っている画像を除去し、画像内のカウント値の平均が2万以上、4万以下のものを選んだ.選んだ画像の各画素について中央値をとってマスターフラットフレームを得ることができる.



[写真 6·2] フラットフレーム(STL-1001E)2014年10月29日にSBIG STL-1001Eで撮影したフラットの画像から作成したフラットフレーム。



[写真 6·3] フラットフレーム(ST·i)2014年10月29日にSBIG ST·i で撮影したフラットの画像から作成したフラットフレーム.

6.3 測光

天体の明るさを測定することを測光と呼ぶ. 測光するときに気をつけなければならないことは、天体の他に空も光を出しているこということである. 天体本来の明るさを測るには上乗せされている空の明るさを引く必要がある.

AIP4WINで測光する場合、天体の明るさを測定する範囲と、空の明るさを測定する範囲を指定することができ、測光時に自動的に空の明るさを減算してくれる.

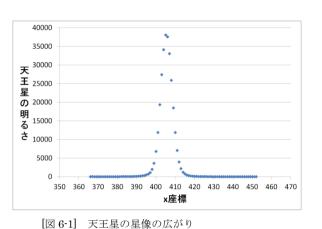
天体の明るさを測定する範囲は、次のように決めた.下のグラフは天王星を映した写真の赤線上のカウント値を示したものである.このグラフはマカリのグラフという機能を使うと同じものがすぐに

表示される. このグラフより、天王星の光は直径約 20 ピクセルに広がっていることがわかるので、 天王星を測光する範囲はこの広がり以上にした.

空の明るさは幅2ピクセルのリング状の範囲で指定した.



[写真 6-4] 天王星の星像の広がり 2013年11月11日に観測した天王星の画像. 露出時間は2秒である.写真の赤い棒上の明る さを図 6-1 で表している.



天王星の光は x 軸の 395~415 ピクセルにわたり 広がっていることがわかる. 天王星の光が入って

いないピクセルも 100 程度明るさがある. これが

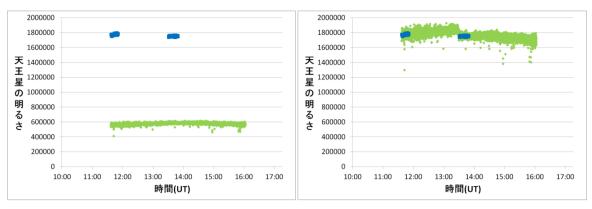
6.4 明るさの換算

2014年の観測では、天王星と標準星を別の望遠鏡、CCD カメラで観測した. 異なるシステムで観測したデータを比較するため、測光された明るさをシステム間で換算するための係数を観測によって決めた. 換算に使う係数を以後、換算係数と呼ぶ. 換算係数は2つのシステムで天王星を同時に観測して決定した.

空の明るさである.

図 6-2、6-3 は 2014 年 10 月 28 日の観測データである。図 6-2 は換算前の天王星明るさ、図 6-3 は換算後の天王星の明るさを表している。青の点は SBIG STL-1001E で観測した天王星の明るさ、緑の点は SBIG ST-i で観測した天王星の明るさである。この日は 11 時半から 16 時まで観測をおこない、その間に 2 回天王星を同時に観測して換算係数を 2 つ求めた。

SBIG ST-i で観測した天王星の明るさを換算し、SBIG STL-1001E で観測した天王星の明るさに合わせた。1つ目の換算係数は2回目の天王星の同時観測までに観測した明るさの換算に使用し、2つ目の換算係数は2回目の天王星の同時観測以降の明るさの換算に使用した。



[図 6-2] 天王星の明るさ(換算前)

露出時間はどちらも1秒で同じであるが、観測した天王星の明るさに差がある.青の点が STL-1001Eで観測した天王星、緑の点がSTi で観測した天王星.

[図 6-3] 天王星の明るさ(換算後) 換算前にあった天王星の明るさの差がない.

6.5 天王星の光度の決定

本研究では標準星に対する天王星の相対的な明るさを測定することで、天王星の光度の絶対値を決めた. その決定方法は以下の通りである.

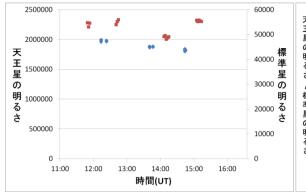
6.5.1 標準星に対する天王星の相対的な明るさ

観測データから標準星の明るさに対する天王星の相対的な明るさを求めた.

図 6-4 は 2013 年 11 月 11 日の観測データである. 縦軸が天王星と標準星のカウント値、横軸が時間である. 青い点は天王星、赤い点は標準星である. 天王星は距離の補正、Illuminated fraction の補正をおこなった後の明るさである.

天王星は点の塊が 4 つある。1 つの塊は $10\sim20$ 個の天王星の点から構成されている。各塊ごとに 天王星の明るさを平均し、それをその時刻の天王星の明るさとした。標準星は点の塊が 5 つあり、 各塊は $3\sim5$ 個の点から構成されている。天王星のとき同様、各塊ごとに標準星の明るさを平均し、 それをその時刻の標準星の明るさとした。

標準星に対する天王星の相対的な明るさは、天王星を撮像した時間と標準星を撮像した時間が最も近い塊同士を組み合わせて求めた(図 6-5).

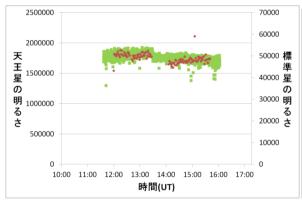


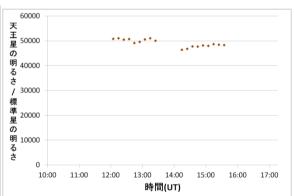
[図 6-4] 天王星と標準星の明るさの時間変化 縦軸は天王星と標準星の明るさ. 横軸は世界時で表 した時間である. 青の点が天王星、赤の点が標準星 である.

[図 6-5] 標準星に対する天王星の相対的な明るさ 縦軸は天王星の明るさ・標準星の明るさ. 横軸は世 界時で表した時間である.

図 6-6 は 2014 年 10 月 28 日の観測データである. 縦軸が天王星と標準星のカウント値、横軸が時間である. 緑の点が SBIG ST-i で撮影した天王星で約 6200 個ある. 露出時間は 1 秒である. 赤い点が SBIG STL-1001E で撮影した標準星で約 130 個ある. 露出時間は 80 秒である. 天王星の明るさは距離と Illuminated fraction の補正をおこなった後のものである. システム間の補正もした後の明るさとなっている.

図 6-7 は標準星の明るさに対する天王星の相対的な明るさを求めた図である。観測データを 10 分ごとに区切り、各区切りごとに天王星と標準星の明るさの平均をそれぞれ計算した。それをその時刻の明るさとした。





[図 6-6] 天王星と標準星の明るさの時間変化 縦軸は天王星と標準星の明るさ. 横軸は世界時で表 した時間である. 緑の点が天王星、赤の点が標準星 である.

[図 6-7] 標準星に対する天王星の相対的な明るさ 縦軸は天王星の明るさ・標準星の明るさ. 横軸は世 界時で表した時間である.

6.5.2 光度の決定

天王星の光度は以下の式で決定した.

$$M_{U} = -2.5 \times \log_{10} \left(\frac{C_{U}}{C_{S}}\right) + M_{S}$$

 M_U は天王星の光度、 C_U は観測された天王星の明るさ、 C_S は観測された標準星の明るさ、 M_S は標準星の光度である.

決定した光度には、エラーバーをつけた. エラーバーは元データのばらつきの大きさから求めた 95%信頼区間である.

7 観測結果

7.1 2013年の観測結果

2013年は7夜観測することができた.フィルターはV、R、B、IRを使用した.Vフィルターを使用して観測した結果を以下に載せる.

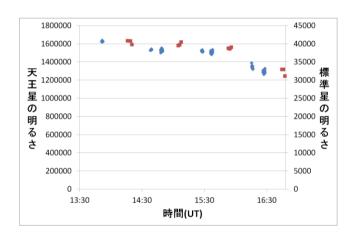
7.1.1 10月29日

世界時で 13 時 50 分から 16 時半まで観測をおこなった。天王星と標準星を交互に観測し、この日は 4 サイクル観測をおこなった。

図 7-1-1 は天王星と標準星の明るさの時間変化を表したものである。青い点は天王星である。1 塊は $10\sim20$ 個の点で構成されている。露出時間は 1 秒と 3 秒で観測しており、3 秒で観測したデータは 1 秒で観測した明るさになるよう換算した。赤い点は標準星である。1 塊は $3\sim5$ 個で構成されている。露出時間は 80 秒である。

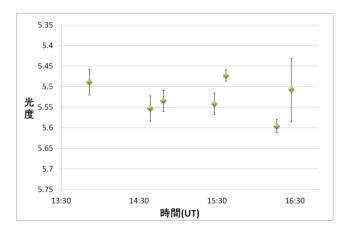
天王星も標準星も時間が経つにつれ暗くなっていることがわかる.

図 7-1-2 は天王星の光度の時間変化を表したものである. この日の観測では 5.47~5.59 等級の間で天王星の明るさは変動していた.



[図 7-1-1] 2013年10月29日の天王星と標準星の明るさの時間変化

縦軸は天王星と標準星の明るさ. 横軸は世界時で表した時間である. 緑の点が天王星、赤



[図 7-1-2] 2013 年 10 月 29 日の天王星の 光度の時間変化

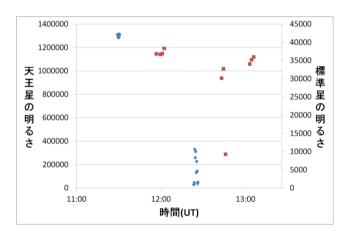
縦軸は天王星の光度. 横軸は世界時で表した時間である.

7.1.2 11月1日

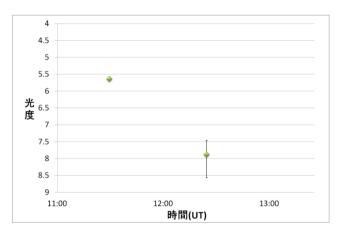
世界時で11時半から13時まで観測した.

図 7-1-3 の天王星の 1 つの塊は $10\sim15$ 個の点で構成されている. 露出時間は 1 秒と 15 秒である. 前半の塊が露出時間 1 秒で、後半の塊が 15 秒である. 15 秒露出で観測した明るさは 1 秒露出のときの明るさになるよう換算した. 標準星の 1 つの塊は $3\sim4$ 個の点で構成されている. 露出時間は 80 秒である.

観測中盤に雲が出てきたため天王星を観測する露出時間を長くした.その後雲が通り過ぎたため標準星の露出時間は80秒のまま変えなかった.この日の天王星の光度の時間変化を見ると(図 7-1-4)、前半は5.63等級、後半は7.87等級である.前半の光度は10月29日の結果とほぼ同じであるが、後半の光度は大きく異なっている.雲が出ていたことを考えると、後半の結果は信憑性が低いと考える.1サイクルで観測した天王星の観測時間が短かったこともあるが、天王星と標準星を交互に観測する場合、大気の状態の変動に対応しにくいことがわかる.



[図 7-1-3] 2013年11月1日の天王星と標準星の明るさの時間変化



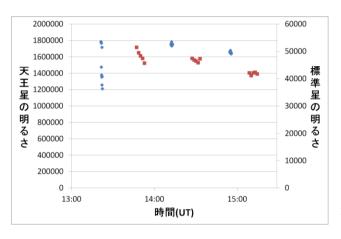
[図 7-1-4] 2013年11月1日の天王星の光度 の時間変化

7.1.3 11月10日

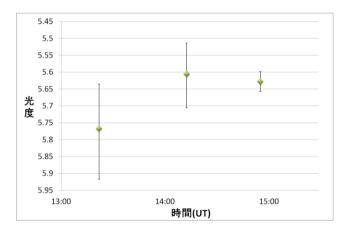
世界時で13時20分から15時20分まで観測した.

図 7-1-5 の天王星の 1 つの塊は 10 個の点で構成されている. 露出時間は 2 秒である. 天王星の明るさは 1 秒露出の明るさに換算した. 標準星の 1 つの塊は 5 個の点で構成されている. 露出時間は 80 秒である. 前半の観測結果は後半に比べるとばらつきが大きい. 原因はわからない.

天王星の光度の時間変化を見ると(図 7-1-6)、1 つ目の光度は比較的暗いが、後半の 2 つは 5.60、5.62 等級となっており、10 月 29 日とほぼ同じ明るさである。前半の観測結果より決定した光度は信憑性が低いと考える。



[図 7-1-5] 2013 年 11 月 10 日の天王星と標準星の明るさの時間変化



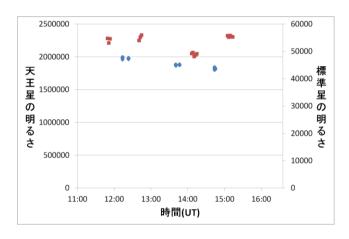
[図 7-1-6] 2013年11月10日の天王星の光 度の時間変化

7.1.4 11月11日

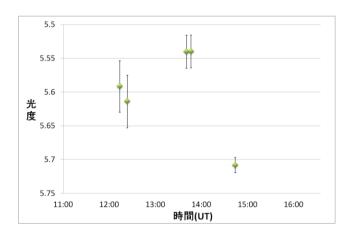
世界時で11時10分から15時10分まで観測した.

図 7-1-7 の天王星の 1 つの塊は $10\sim20$ 個の点で構成されている. 露出時間は 1 秒と 2 秒である. 5 つ塊があり、前半の 2 つが 1 秒露出である. 2 秒で観測した天王星の明るさは 1 秒露出で観測した明るさに換算した. 標準星の 1 つの塊は $3\sim5$ 個の点で構成されている. 露出時間は 80 秒と 120 秒である. 120 秒で観測した標準星の明るさは 80 秒露出で観測した明るさに換算した. 4 つ塊があり、最初の 1 つが 80 秒露出である.

11月11日は1つの塊内でのバラつきが他の観測日に比べて小さかった。天王星の光度の時間変化を見ると(図 7-1-8)、光度は一夜のうちに $5.53\sim5.70$ 等級変化した。



[図 7-1-7] 2013年11月11日の天王星と標準星の明るさの時間変化



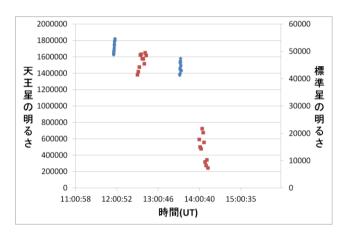
[図 7-1-8] 2013年11月11日の天王星の光 度の時間変化

7.1.5 11月26日

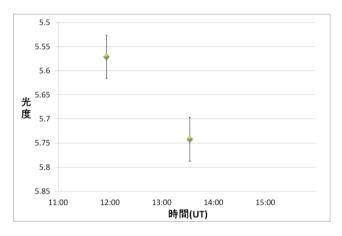
世界時で12時から14時10分まで観測した.

図 7-1-9 の天王星の 1 つの塊は 20 個の点で構成されている.露出時間は 2 秒である.天王星の明るさは 1 秒露出の明るさに換算した.標準星の 1 つの塊は 10 個の点で構成されている.露出時間は 80 秒である.2 回目に観測した標準星が明らかに暗い.これは天候が悪化したためである.

図 7-1-10 の天王星の光度はどちらも 1 回目に観測した標準星の明るさと比べて決定した. 前半は 5.57 等級、後半は 5.75 等級である. 前半の光度は他の観測日とほぼ同じ結果であったが、後半はや や暗い. これは天王星を 2 回目に観測した頃から天候が悪化し始めたためだと考える. そのため後 半の観測結果は信憑性が低いと考える.



[図 7-1-9] 2013年11月26日の天王星と標準星の明るさの時間変化



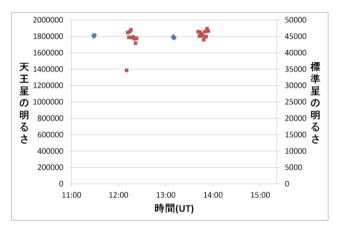
[図 7-1-10] 2013年11月26日の天王星の光 度の時間変化

7.1.6 11月28日

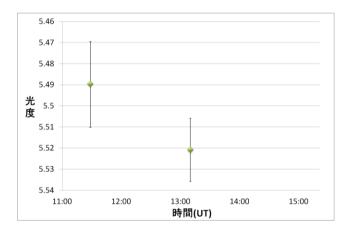
世界時で 11 時半から 14 時まで観測した.

図 7-1-11 の天王星の 1 つの塊は 20 個の点で構成されている. 露出時間は 3 秒である. 天王星の明るさは 1 秒露出の明るさに換算した. 標準星の 1 つの塊は 10 個の点で構成されている. 露出時間は 80 秒である.

11 月 28 日は 1 つの塊内でのバラつきが他の観測日に比べてかなり小さかった. この日に観測された天王星の光度は 5.49 等級と 5.52 等級であった(図 7-1-12).



[図 7-1-11] 2013年11月28日の天王星と標準星の明るさの時間変化



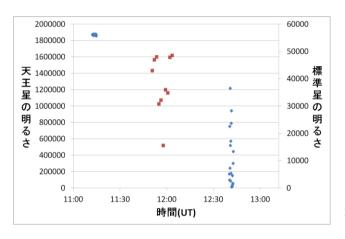
[図 7-1-12] 2013年11月28日の天王星の光 度の時間変化

7.1.7 11月29日

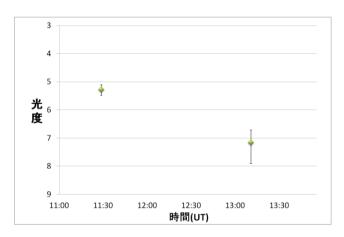
世界時で11時10分から12時40分まで観測した.

図 7-1-13 の天王星の 1 つの塊は 20 個の構成されている.露出時間は 3 秒である.天王星の明るさは 1 秒露出の明るさに換算した.標準星の 1 つの塊は 10 個の点で構成されている.露出時間は 80 秒である.

始めに観測した天王星はほとんどばらついていないが、その後観測した標準星と天王星は大きくばらついている。これは天候が悪化したためだと考える。天王星の光度を求めたが信憑性に欠けている(図 7-1-14).



[図 7-1-13] 2013年11月29日の天王星と標準星の明るさの時間変化



[図 7-1-14] 2013年11月29日の天王星の光 度の時間変化

7.2 2014年の観測結果

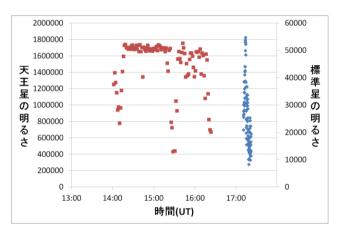
2014 年は 7 夜観測することができたが、そのうち 2 夜は観測対象を間違えてしまい、もう 1 夜は機材調整にあてたため天王星の光度はない。9 月の観測では天王星と標準星を交互に観測した。フィルターは V のみを使用した。10 月と 11 月の観測では天王星と標準星を同時に観測した。

7.2.1 9月20日

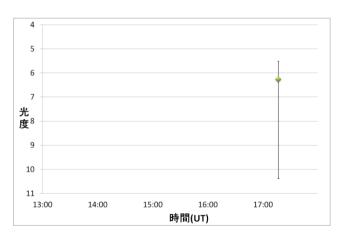
世界時で14時から17時20分まで観測した.

図 7-2-1 は SBIG STL-1001E で観測した結果である. 天王星の明るさは 100 個ある. 露出時間は 2 秒である. 天王星の明るさは 1 秒露出の明るさに換算した. 標準星の明るさは 100 個ある. 露出時間は 80 秒である.

9月20日は天王星、標準星ともに非常にばらつきが大きかった. 原因は天候が悪かったためである. そのため決定した天王星の光度には信憑性がないと考える(図 7-2-2).



[図 7-2-1] 2014年9月20日の天王星と標準 星の明るさの時間変化



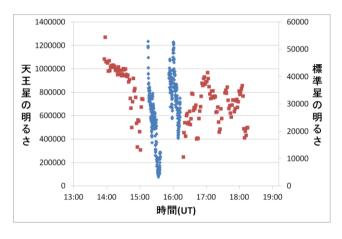
[図 7-2-2] 2014年9月20日の天王星の光度 の時間変化

7.2.2 9月22日

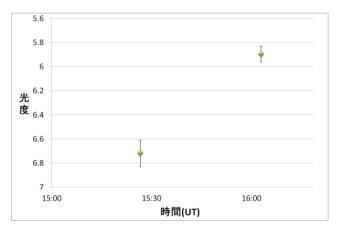
世界時で14時から18時15分まで観測した.

図 7-2-3 は SBIG STL-1001E で観測した結果である。天王星の 1 つの塊は約 200 個の点で構成されている。露出時間は 2 秒である。天王星の明るさは 1 秒露出の明るさに換算した。標準星の 1 つの塊は $50\sim80$ 個の点で構成されている。露出時間は 80 秒である。

9月22日は天王星、標準星ともに非常にばらつきが大きかった。天候が悪かったことが原因だと考える。そのため決定した天王星の光度には信憑性がないと考える(図 7-2-4).



[図 7-2-3] 2014年9月22日の天王星と標準 星の明るさの時間変化



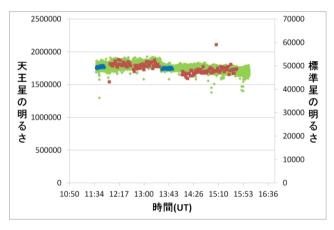
[図 7-2-4] 2014年9月22日の天王星の光度 の時間変化

7.2.3 10月28日

世界時で14時から17時20分まで観測した.

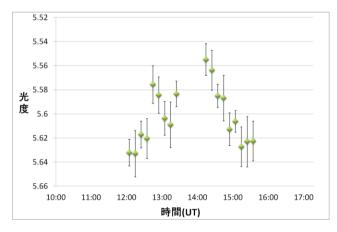
図 7-2-5 は SBIG STL-1001E で観測した天王星を青い点で表している。1 つの塊は 300 個の点で構成されている。露出時間は 1 秒である。SBIG STL-1001E で観測した標準星を赤い点で表している。1 つの塊は約 100 個の点で構成されている。露出時間は 80 秒である。SBIG ST-i で観測した天王星を緑の点で表しており、データ数は約 7500 個である。露出時間は 1 秒である。観測データを 10 分間で区切り、その間の約 300 個の天王星明るさの平均と、約 6 ~ 8 個の標準星の明るさの平均を比べることで、光度を 1 つ決定した。

この日に観測された天王星の光度は 5.55~5.63 等級であった(図 7-2-6).



[図 7-2-5] 2014 年 10 月 28 日の天王星と標準星の明るさの時間変化

STL-1001E で観測した天王星の明るさを青い 点、標準星の明るさを赤い点で表している. ST-i で観測した天王星の明るさを緑の点で表 している.



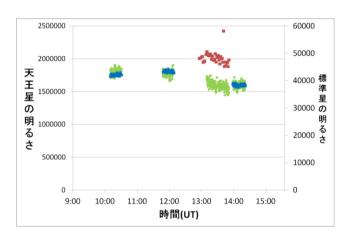
[図 7-2-6] 2014 年 10 月 28 日の天王星の光度 の時間変化

7.2.4 11月27日

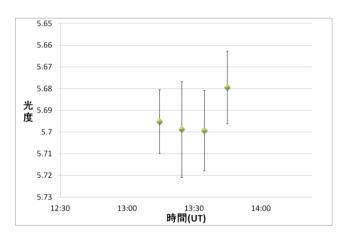
世界時で14時から17時20分まで観測した.

図 7-2-7 は SBIG STL-1001E で観測した天王星を青い点で表している。1 つの塊は 200 個の点で構成されている。露出時間は 1 秒である。SBIG STL-1001E で観測した標準星を赤い点で表しており、約 40 個のデータがある。露出時間は 80 秒である。SBIG ST·i で観測した天王星を緑の点で表している。1 つの塊は $100\sim200$ 個の点で構成されている。露出時間は 10 秒である。3 度、両方の望遠鏡で天王星を同時観測しており、SBIG ST·i で観測した天王星の明るさの換算には 3 度目のデータを使用した。観測データを 10 分間で区切り、その間の約 45 個の天王星明るさの平均と、約 $6\sim8$ 個の標準星の明るさの平均を比べることで、光度を 1 つ決定した。

この日に観測された天王星の光度は5.67~5.70等級であった.



[図 7-2-7] 2014年11月27日の天王星と標準星の明るさの時間変化

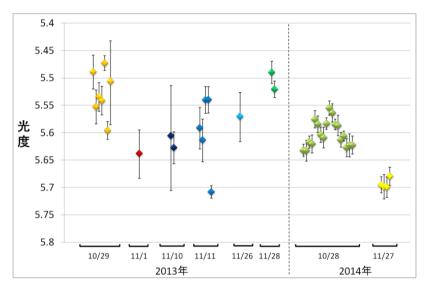


[図 7-2-8] 2014年11月27日の天王星の光度 の時間変化

8 考察

8.1 2013年、2014年の観測結果

図 8-1 は 2013 年 10 月 29 日、11 月 1 日、11 月 10 日、11 月 11 日、11 月 26 日、11 月 28 日の 6 夜の観測結果と、2014 年 10 月 28 日、11 月 27 日の 2 夜の観測結果を並べた図である。ただし 2013 年 11 月 1 日、11 月 10 日、11 月 26 日の観測結果で明らかにおかしい値だったものは除いてある。



[図 8-1] 2013年、2014年の観測結果を並べた図

2013年の観測結果と比べて、2014年の観測結果ではエラーバーが小さくなった。このエラーバーは天王星と標準星の明るさの平均を取った元のデータのばらつきの大きさから求めた 95%信頼区間である。このエラーバーが小さくなったのは同時観測することによってデータ数が増えたためである。データ数が増えたため信頼度が上がったと言える。

2013年の観測結果では、天王星は 5.47~5.71 等級であった. 2014年は 5.55~5.70 等級であった. 2013年の結果と比べると、2014年は光度がよく決まっているようにも見えるが、観測データが少ないため確定的なことは言えない.

8.2 天王星アルベドの季節変化

図 8-2 の 1950 年から 2007 年までの天王星の光度の変化は Hammel and Lockwood (2007)で報告 されたもので、それに本研究の 2013 年、2014 年の結果を追加した。2013 年と 2014 年は、それぞれの年に測定された光度の平均で、エラーバーは測定された光度のばらつき(1σ)である。本研究は 天王星の V 等級を測定したものなので、Lockwood (2005)に従って V 等級を y 等級に変換した。観測データのばらつきは大きいが、本研究で得られた天王星の光度は先行研究の天王星の光度と整合的

であるように見える.

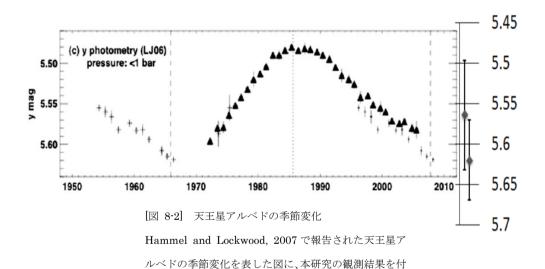
仮に観測された変動が実際の天王星のアルベドの変動によるものであるとすると、天王星は数時間の時間スケールでも季節変化と同程度の大きさの変動をしていることになるが、数時間程度の時間スケールで天王星のアルベドが変動することはないと考えられる. そうであるとすると観測された変動は観測の誤差ということになる.

天王星アルベドの季節変化は 0.1 等級ほどであることを考えると、季節変化の詳細を議論するためには 0.01 等級くらいの精度で天王星の光度を決定する必要がある. 本研究では、天王星の光度が 0.1 等級程度ばらついたので、このままでは天王星アルベドの季節変化を議論することは難しいと言える.

天王星の光度を精度よく決定するためには、観測誤差の原因を特定する必要がある.しかし今回は、 その原因を特定することはできなかった.

変動の要因が何であるかにもよるが、その影響がランダムであるならば単純に観測回数を増やすことで推定の精度を上げることができるかもしれない.

観測に 0.1 等級のばらつきがあるときに 0.01 等級の精度で推定をおこなうためには、100 点のデータが必要とされる. 1 夜に 10 点のデータを取得することができるならば、10 夜の観測によって達成することができる.



け加えた.

9 まとめ

9.1 本研究のまとめ

天王星アルベドの季節変化を調べることを目的として研究を進めた.

星空公園 60cm 反射望遠鏡を用いて天王星の測光をおこなう手法を構築し、実際に天王星の光度の絶対値を観測した. 2013 年の観測結果から大気減光が観測の精度に大きな影響を与えていると考え、2014 年には望遠鏡と CCD カメラを 2 セット用意し、天王星と標準星を同時観測する新しい観測システムを構築し、観測をおこなった.

観測データから現在の天王星の光度の絶対値を決定した.

本研究で決定した天王星の光度は先行研究から予想される光度とおおむね整合的であった.一方で、 天王星アルベドの季節変化を議論するに足る精度を達成することはできなかった.

謝辞

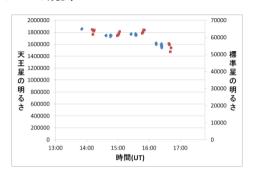
本研究をおこなうにあたり、御指導いただきました指導教員である はしもと じょーじ 准教授に 心より感謝いたします.

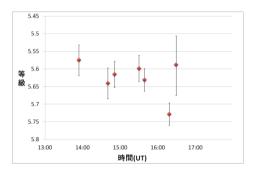
藤原 貴生 技官には星空公園までの移動や望遠鏡の整備をしていただきました. 同研究室の 矢野 和希 さんには、観測のお手伝いや話し相手になっていただき、本研究を支えていただきました.

付録

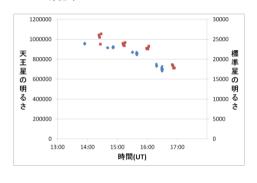
2013年10月29日の観測結果

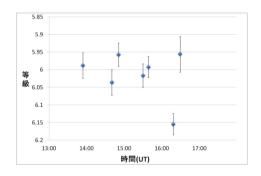
Rフィルターで観測

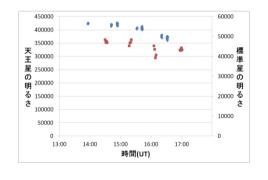


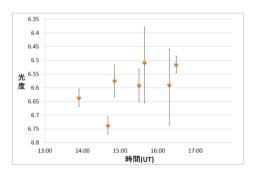


Bフィルターで観測



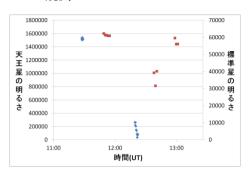


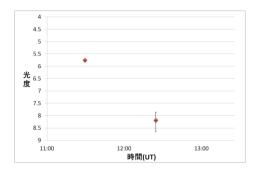




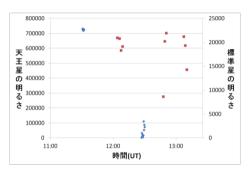
2013年11月1日の観測結果

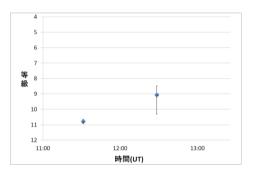
R フィルターで観測

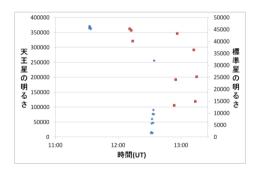


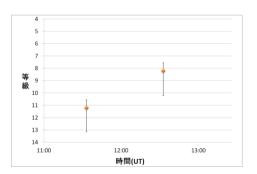


Bフィルターで観測



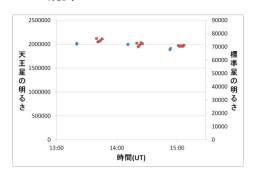


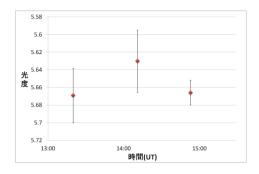




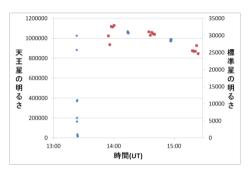
2013年11月10日の観測結果

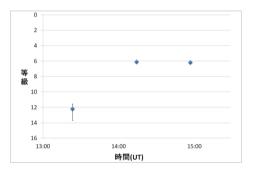
R フィルターで観測

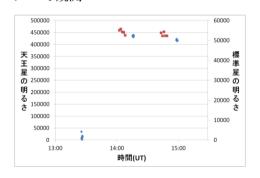


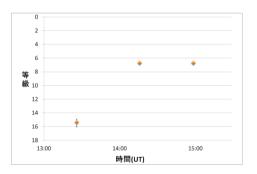


Bフィルターで観測



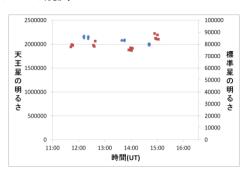


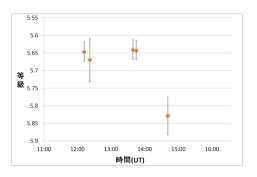




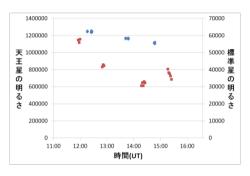
2013年11月11日の観測結果

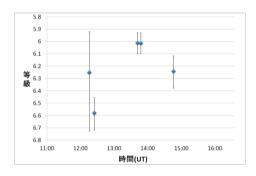
R フィルターで観測

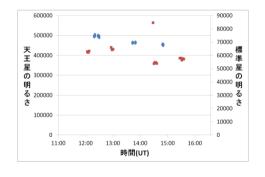


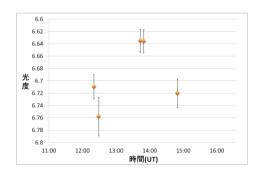


Bフィルターで観測



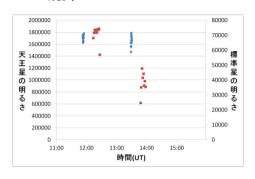


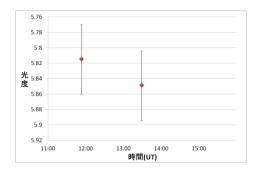




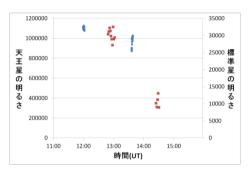
2013年11月26日の観測結果

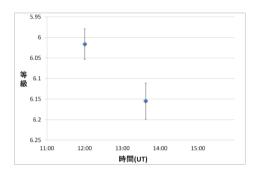
R フィルターで観測

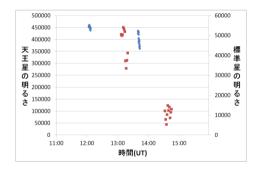


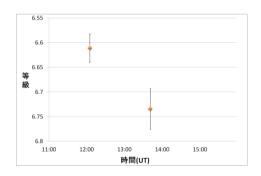


Bフィルターで観測



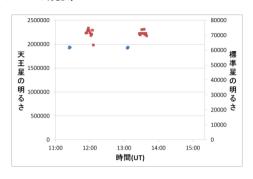


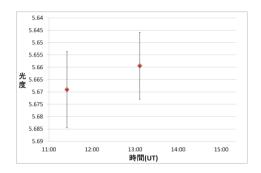




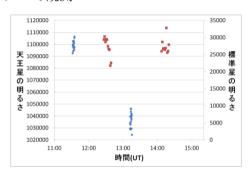
2013年11月28日の観測結果

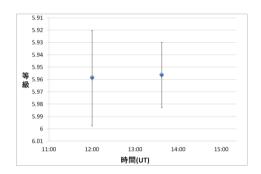
R フィルターで観測

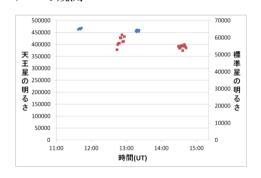


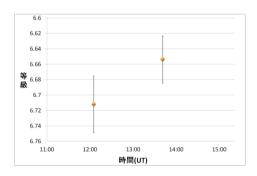


Bフィルターで観測



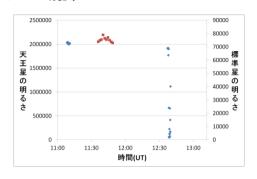


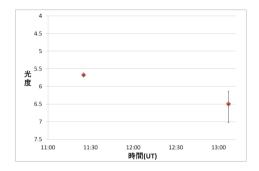




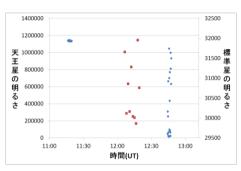
2013年11月29日の観測結果

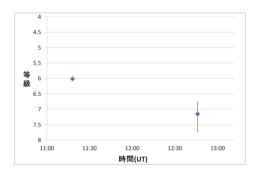
R フィルターで観測

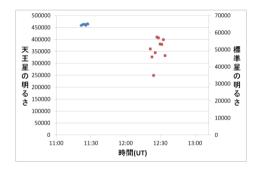


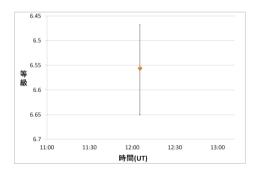


Bフィルターで観測









参考文献

Berry, R., Burnell, J. 2005 : The Handbook of Astronomical IMAGE PROCESSING. Willmann-Bell

Hammel, H. B., Lockwood, G. W. 2007: Long-term atmospheric variability on Uranus and Neptune. Icarus 186 291-301.

HORIZONS Web-Interface

http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi

Lockwood, G. W., Jerzykiewicz, M 2006: Photometric variability of Uranus and Neptune, 1950-2004. Icarus 180 442-452.

Main Index of Equatorial UBVRAI Photometric Standard Stars http://james.as.arizona.edu/~psmith/61inch/ATLAS/tableA.html

Sinton, W. M., 1959: The albedo and phase variation of Uranus and Neptune. Lowell Obs. Bull. 4, 93-97.

すばる画像解析ソフト マカリ

https://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html.ja