2017年10月の
天王星測光観測

岡山大学　理学部　地球科学科

05426526　山脇 雅晃

2018/02/15

要旨

天王星のアルベドは一定ではなく，約 40 年の周期で変動していると言われている(Hammel and Lockwood 2007)．この天王星アルベドの変動は，天王星の公転に伴って太陽直下点の緯度が変化することによって生じると考えられているが，天王星の明るさが十分な精度で観測された期間は天王星の 1 公転周期(84 年)に達しておらず，特に北半球の夏至は未だ観測されていない．

本研究は，岡山大学天文台で V バンドを用いて天王星の測光観測をおこなった．天王星と同一フレーム上に写る 3 つに恒星のアンサンブルに対して相対測光をおこない，2017 年 10 月の天王星の V 等級は 5.707±0.022 等級と求められた．本研究で得られた光度は，太陽直下点の緯度が同程度の時期に観測された天王星の光度とほぼ同様のものであった．

目次

第一章 序論 4

1.1 天王星のアルベド 4

第二章 観測 7

2.1 観測日と観測機材 7

2.2 デフォーカス撮像 8

2.2.1 測光精度と積分時間 8

2.2.2 露出時間の制約 9

2.3 観測手順 10

第三章 解析 12

3.1 一次処理 12

3.1.1 ダーク 12

3.1.2 フラット 13

3.2　測光 13

3.3　大気減光 16

3.4　相対測光 17

3.5　天王星の明るさの絶対値推定 18

3.6　アンサンブル測光 18

3.7　天王星の明るさ 19

第四章 天王星アルベドの時間変化 20

4.1　距離と満ち欠けの補正 20

4.2　天王星アルベドの変動 20

第五章　まとめ 22

第一章　序論

1.1 天王星のアルベド

天王星は太陽系の惑星のひとつで，太陽からの平均距離は約 19 天文単位，約 84 年の公転周期で太陽のまわりをまわっている(表 1.1)．天王星は自ら光を放つことはなく，太陽の光を反射して輝いている．そのため，天王星の光度は太陽からの距離とアルベドによって決まる．アルベドとは反射率のことであり，太陽から天体に入射した太陽光に対して天体が反射した太陽光の量の割合である．天王星のアルベドは季節変化していることが知られている(Hammel and Lockwood, 2007).

表 1.1　天王星の軌道要素.

軌道長半径（AU）	19.19
公転周期（yr）	83.7
自転周期（h）	17.24
離心率（deg）	0.046
自転軸傾斜角（deg）	97.86
軌道傾斜角（deg）	0.773

de Pater and Lissauer (2010) より引用.

図 1.1 は天王星の明るさの時間変化を描いたものである．データは Hammel and Lockwood (2007)，戸田(2015)，中村(2016)の結果を使用した．横軸は時間、縦軸は明るさである．この図に示した明るさは距離の補正をした後の明るさなので、そのままアルベドの変化と見ることができる．図を見て明らかなように，天王星のアルベドは公転周期の半分である約 40 年の周期で変動していることがわかる．

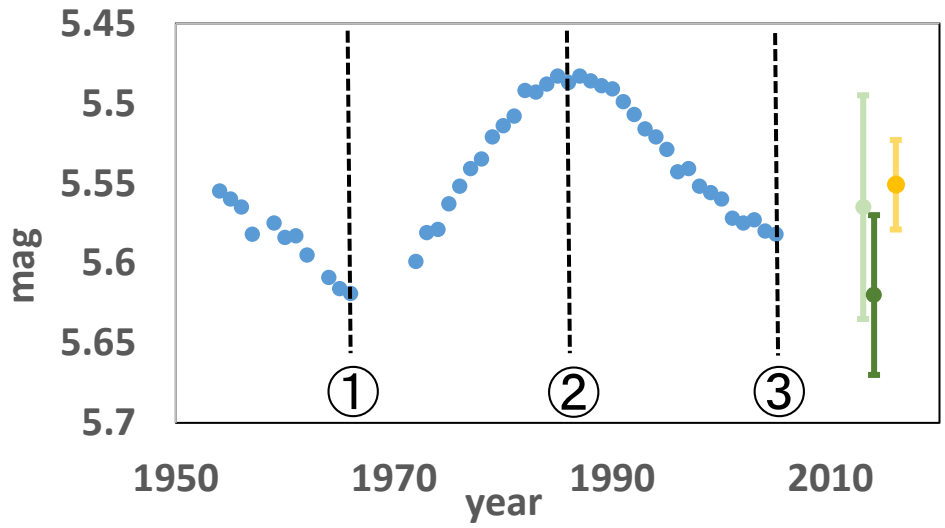

図 1.1　天王星の明るさの時間変化. 青は Hammel and Lockwood (2007), 薄緑は戸田 (2013), 緑は戸田 (2014), 黄は中村 (2016)

このアルベドの変動は天王星の自転軸が大きく傾いていることに関係していると考えられている. 図 1.1 中の①は秋分, ②は冬至, ③は春分を表していて, それぞれの時期における太陽と自転軸の位置関係は図 1.2 に示したようになっている. 天王星の自転軸傾斜角は 98° で, 天王星の自転軸は公転面にほぼ平行な方向に向いている. そして太陽が赤道の上から照らす①や③のときにアルベドは小さくなり, 太陽が極の上から照らす②の時期にアルベドは大きくなっている. このように天王星のアルベドは太陽が天王星をどの方向から照らすかによって決まっているように見えるが, よく見てみるとそれ以外の変動もあるように見える. 例えば, 公転周期よりも長い周期で徐々に明るくなっているように見える. また、北半球の夏至はまだ観測されておらず, 現在は季節変化のように見えている変動が本当に季節変化なのかどうかははっきりしない. 本研究では, 2017 年 10 月の天王星の明るさを観測的に決定した.

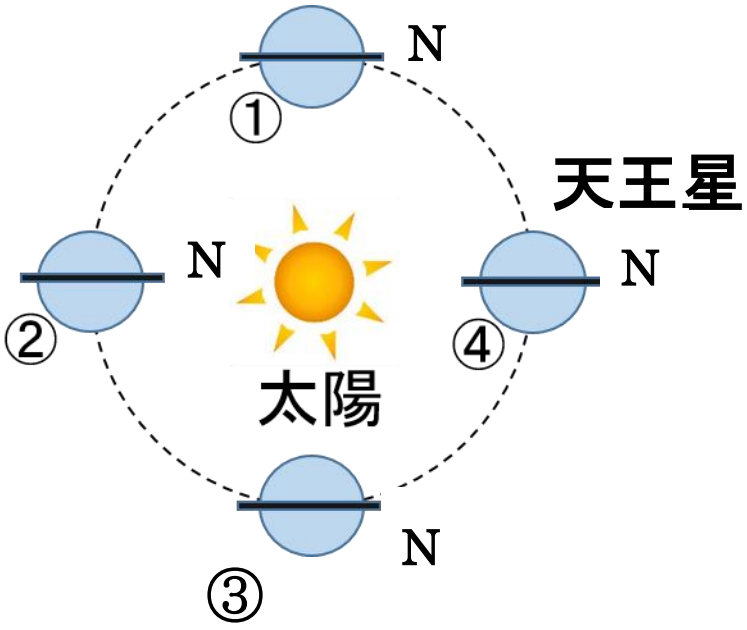

図 1.2　天王星と太陽の位置関係．図は天王星の公転面を北極星の方向から見たもの．N は天王星の北極を表す．

第二章　観測

2.1　観測日と観測機材

観測は，岡山大学天文台(東経 133”55’21.4，北緯 34”41’19.1)で 2017 年 10 月 25 日の夜におこなった．

観測に用いた望遠鏡(MEADE LX600-35F8ACF)は口径 356(mm)，焦点距離 2845(mm)(図 2.1)，CCD カメラ(SBIG STL-1001E)は検出器の大きさが 24.6×24.6(mm)，ピクセル数が 1024×1024(図 2.2)である．観測にはジョンソンのＶフィルターを使用した．フィルターの透過率は図 2.3 に示す．

図 2.1　望遠鏡

図 2.2　CCD カメラ
(http://www.sbig-japan.com/STL-1001E.html から引用)

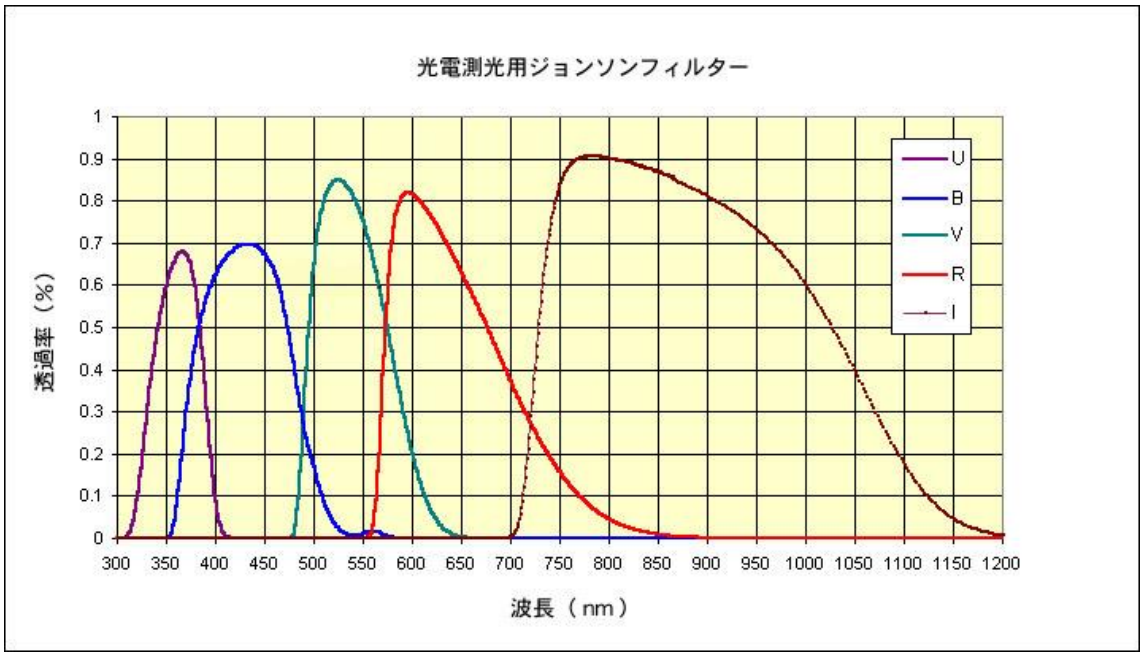

図 2.3　フィルター透過率
(http://www.sbig-japan.com/UBVRI/ubvri_m.html#Anchor:CSubvriG　から引用)

2.2　デフォーカス撮像

本研究は測光の精度を上げるため，デフォーカス撮像をおこなった．デフォーカス撮像とは，焦点をわざと外して撮像する観測手法である．デフォーカス撮像で測光精度が上がる理屈を以下に述べる．

2.2.1　測光精度と積分時間

測光の精度は，受けた光の量の平方根に比例してよくなっていく．つまり，たくさん光を受ければ受けるほど測光の精度はよくなる．受け取る光の量は画像一枚当たりの露出時間と撮像枚数に比例する．その意味では短い露出時間でたくさん撮像することと長い露出時間で少数撮像することは同じである．しかし，画像の読み出しに時間がかかるため長い露出時間で少数撮像するほうがトータルの積分時間を長くすることができる．表 2.1 は画像の読み出し時間が 5 秒の装置で露出時間 1 秒と 10 秒の撮像をおこなったとき，1 分間の観測時間における積分時間(露出時間×撮像枚数)をまとめたものである．露出時間を長くする方が積分時間を長くできることがわかる．

表 2.1　露出時間と積分時間.

露出時間(秒)	画像読み出し時間(秒)	1 分間あたりの撮像枚数(枚)	1 分間当たりの積分時間(秒)
1	5	10	10
10	5	4	40

2.2.2　露出時間の制約

光の量を測る CCD は，光を貯めるバケツに例えられる．シャッターを開けると光がバケツに入り，光子が電子に変換されてバケツに貯まる．露出時間が経過した後シャッターを閉じて，バケツに貯まった電子の数を数えることで光の量を測る．入ってくる光が多くなりすぎると，バケツから電子が溢れる．これを飽和と呼ぶ．観測では，飽和が起こらないように露出時間を設定する必要がある．

焦点を外すと，焦点が合っているときと比べて像が拡がる(図 2.4)．このとき，素子(バケツ)一個に振り分けられる光子の数は減るので，焦点を合わせたときに比べて露出時間を長く設定することができる．

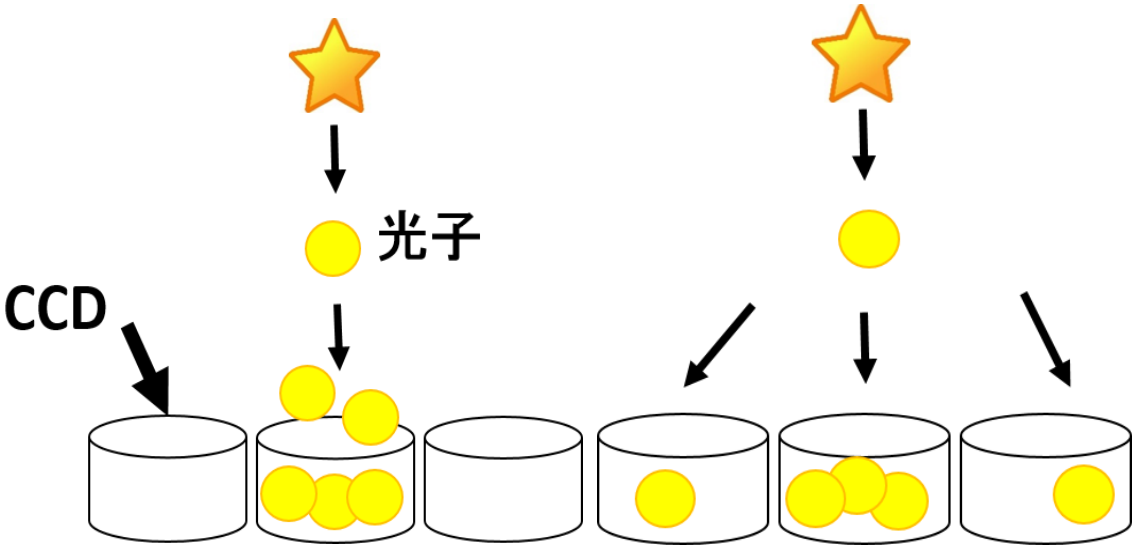

図 2.4　焦点を合わせた場合　　図 2.5　焦点を外した場合

2.3　観測手順

観測は V フィルターを用いて連続撮像をおこなった．天王星の撮像は露出時間 20 秒で 51 枚撮像を 1 セットとし, 3 セットおこなった．1 セットの撮像にはおよそ 21 分かかった (図 2.6).

撮像の結果 151 枚の画像データを取得した．観測の詳細は表 2.2 にまとめた.

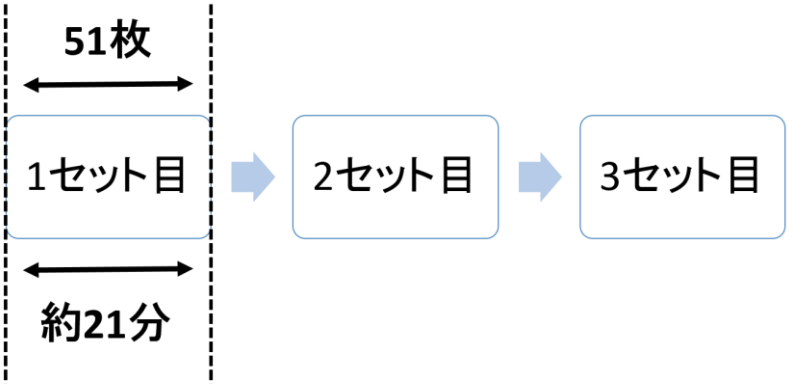

図 2.6　天王星の観測

表 2.2　2017 年 10 月 25 日の観測記録

Object	CCD 冷却温度(度)	フィルタ	露出時間(秒)	枚数(枚)	撮像開始時間
Uranus	-30.2	V	20	51	24:24
Uranus	-30.2	V	20	51	25:24
Uranus	-30.2	V	20	51	26:10
Flat	-30.2	V	5	11	27:15
Dark	-30.2	V	5	11	27:21
Dark	-30.2	V	20	11	27:25

第三章　解析

3.1　一次処理

取得した全ての画像について，ダーク引きとフラット割りをおこなった.

一次処理には ImageJ を使用した．ImageJ の使い方については (http://slittlefair.staff.shef.ac.uk/teaching/phy217/lectures/instruments/L13/index.html) を参考にした.

3.1.1　ダーク

CCD は光が全く入らない状態にしていても電子の熱運動により放出された電子を出力してしまう．これをダークノイズという．ダークノイズのみを撮像した画像をダーク・フレームと呼ぶ．ダーク・フレームを作成し，観測した画像から引き算することでダークノイズの補正をおこなう．この作業をダーク引きと呼ぶ.

ダーク・フレームは CCD に光を全く入れずに撮像することで取得する．ダークノイズは露出時間と CCD の冷却温度に依存するため，観測と同じ条件(露出時間, CCD の冷却温度)でダーク・フレームを撮像した.

本研究では，露出時間 5 秒, CCD 冷却温度 - 30.2 度で 11 枚，露出時間 20 秒, CCD 冷却温度 - 30.2 度で 11 枚のダーク・フレームを撮像した．露出時間ごとに撮像したダーク・フレームの中央値をとり，ダーク引きに使用する合成ダーク・フレームを作成した(図 3.1-3.2).

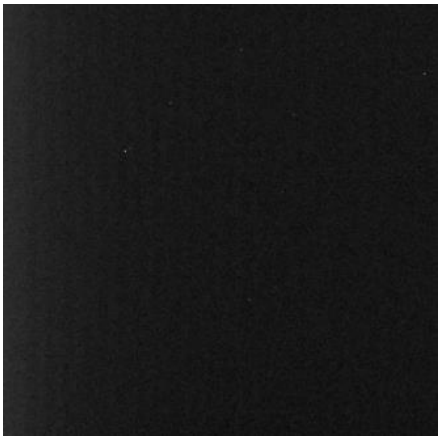

図 3.1　合成ダーク・フレーム (5 秒露出)

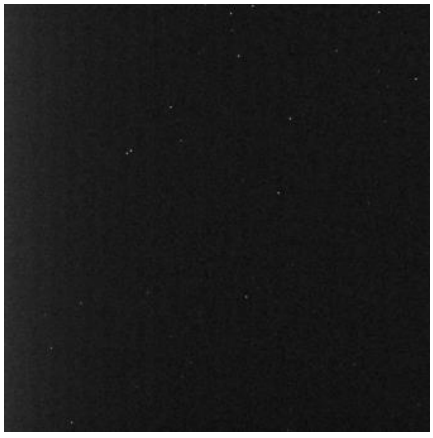

図 3.2　合成ダーク・フレーム (20 秒露出)

3.1.2　フラット

フラットは, 望遠鏡に一様な明るさの光を入れて撮像した画像である．観測して得た画像をフラットで割り算することで, 望遠鏡の光学系や CCD に由来するムラを補正する．これをフラット割りと呼ぶ.

本研究では, 露出時間 5 秒, CCD の冷却温度 - 30.2 度で 11 枚のフラット・フレームを撮像した.

撮像したフラット・フレームはダーク引きをおこない, 次に各フレームをそれぞれの平均値で割り算することで規格化し, 規格化した 11 枚の画像の中央値をとって合成フラット・フレームを作成した(図 3.3).

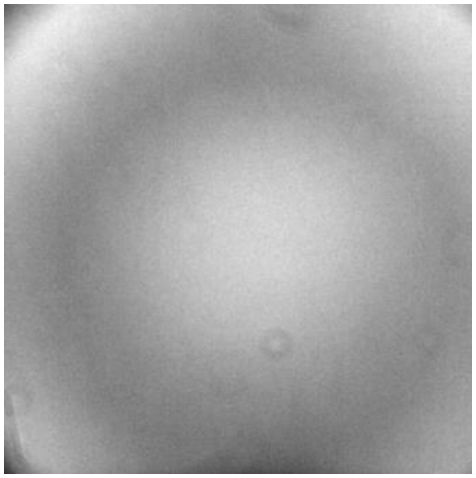

図 3.3　合成フラット・フレーム

3.2　測光

測光は, Makali`i (http://www.nao.ac.jp/others/Makalii/index.html)を使用しておこなった.

測光とは, 天体の明るさを測定することである．本研究では, 天王星とその周囲に写っていた 3 つの恒星(恒星 A, 恒星 B, 恒星 C)について測光をおこなった(図 3.4).

測光するときには，天体だけでなく空も光を出しているということに注意しなければならない．天体本来の明るさを測定するためには上乗せされている空の明るさを引く必要がある．これはスカイ引きと呼ばれる．Makali`i の開口測光では，スカイ引きは自動的におこなわれる．

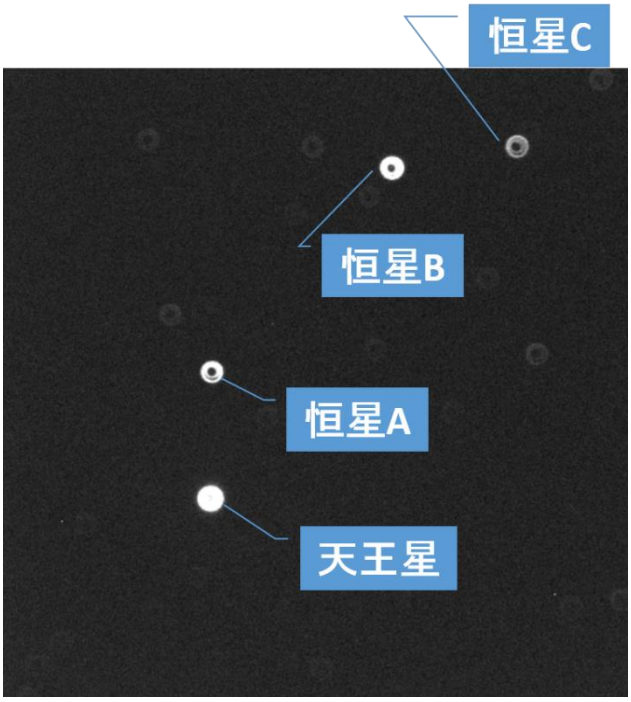

図 3.4　一次処理後の画像

Makali`i で開口測光を選択して恒星径, sky 内径, sky 幅を設定し，測光する天体を選択すると，図 3.5 のような 3 重の円が現れる．図 3.6 は 図 3.5 の天王星を拡大したものである．開口測光をおこなう際に設定した恒星径の値がピンクの円の大きさを, sky 内径が内側の青い円の大きさを, sky 幅が青い 2 つの円の間の幅をそれぞれ決定している．Makali`i は青の 2 つの円の間の明るさから空の明るさを推定し，ピンクの円内の明るさ(星の明るさ＋空の明るさ)から推定された空の明るさを引くことで，星の明るさを測定する．

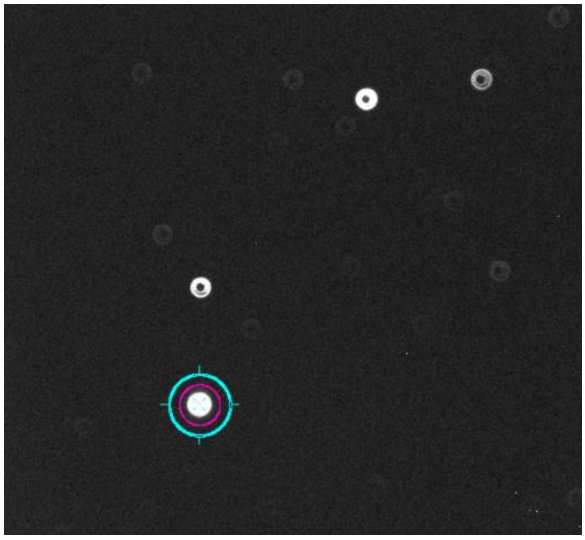

図 3.5　Makali`i を用いた測光の様子

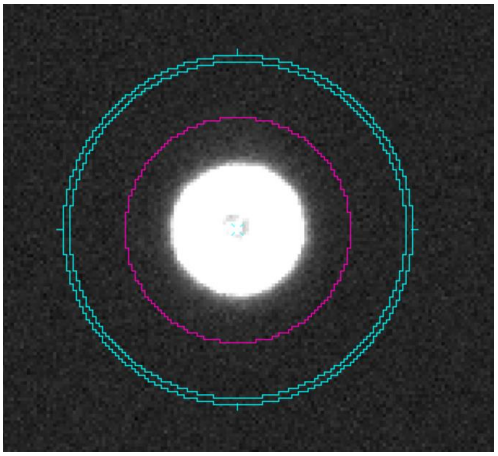

図 3.6　測光の様子(拡大図)

本研究の測光では，恒星径(星の明るさを測る範囲), sky 内径と sky 幅(空の明るさを推定する領域)として表 3.1 にある値を使用した．これらの値は星像の広がり方を考慮して決定した．図 3.7 は恒星径を変えて天王星を測光した結果である．恒星径の値が小さいと天体の光のカウント漏れが起きる．逆に恒星径の値が大きすぎると sky の不定性による誤差が大きくなる．また, sky の測定は極力天体の近くでおこなう方がよいが，天体に近すぎると星から漏れる光の影響を受けてしまうためよくない.

本研究では，恒星径の値を少しずつ大きくしていき，恒星径の値を大きくしてもカウント値がそれ以上増えないような恒星径の値を使った．また, sky 内径は恒星径の 1.5 倍の値を用いた.

表 3.1　測光に用いたパラメータの値

	恒星径（pix）	Sky 内径（pix）	Sky 幅（pix）
天王星	34	51	2
恒星 A	26	39	2
恒星 B	26	39	2
恒星 C	26	39	2

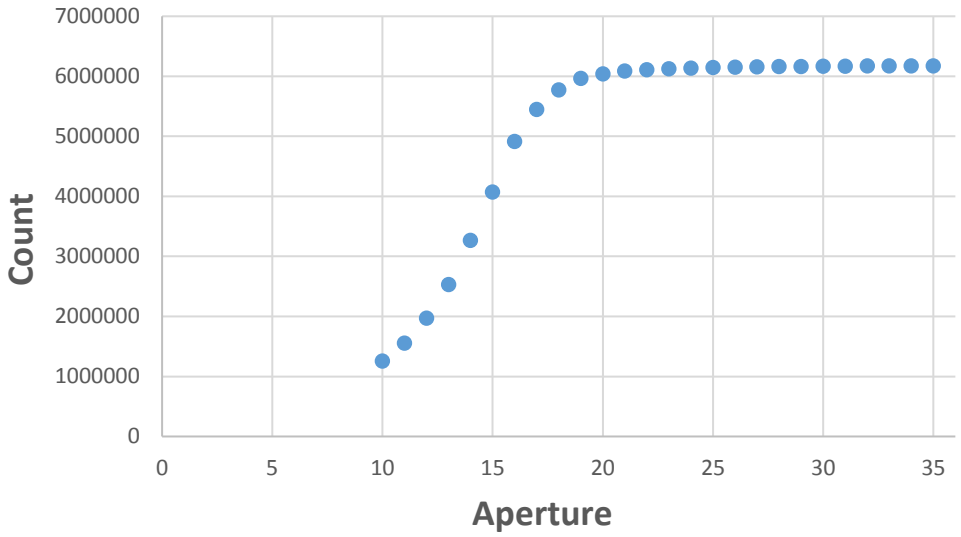

図 3.7　2017 年 10 月 25 日の天王星の星像の広がり方.
縦軸はカウント値，横軸は恒星径のピクセル数を表す.

3.3　大気減光

図 3.8 は測光結果である．天王星と恒星，どちらも時間が経つにつれ暗くなっている．恒星は明るさが変わらない星なので，この結果は星そのものが暗くなったのではなく，地上で観測しているせいで暗くなったものと考えられる．星の光は大気を通過する際に大気によって吸収・散乱されることにより減光する．これを大気減光という．本研究では，相対測光をおこなって，大気減光の影響を補正した.

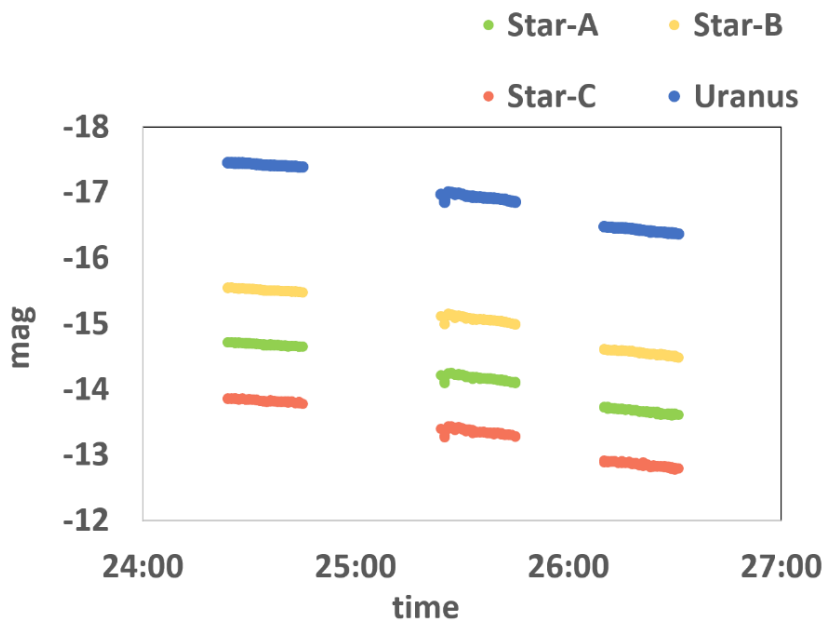

図 3.8　測光結果．縦軸は等級，横軸は時間である．
青は天王星で黄色，緑，赤は恒星を示している．

3.4　相対測光

相対測光とは，比較星に対する相対的な明るさを決めることである．図 3.9 のように 100 と 200 の明るさの星があるとする．大気による減光率が 50%のとき，これらの星はそれぞれ 50 と 100 の明るさで観測される．大気減光があることによって，観測された明るさは星本来の明るさとは違ったものになるが，観測された 2 つの星の明るさの比は 1:2 で，これは星本来の明るさの比を保っている．このことは，大気減光の大きさに依らずいつでも成り立つ．大気減光の大きさを知らなくても，星本来の明るさの比は知ることができる．

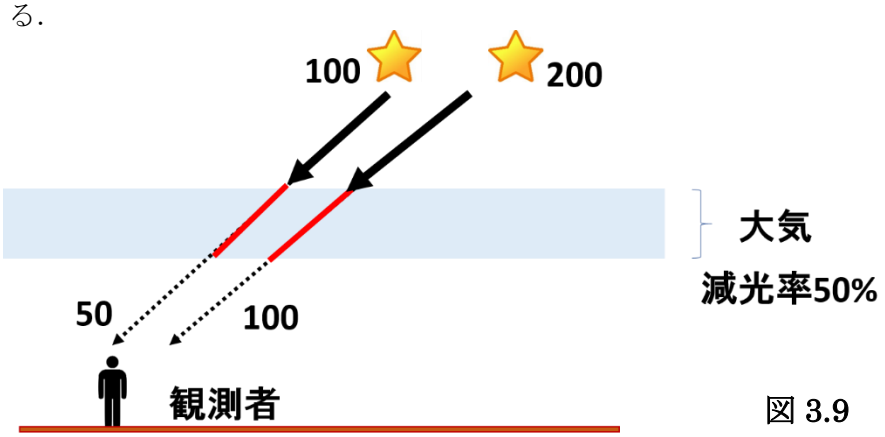

図 3.9　星の明るさの比

3.5　天王星の明るさの絶対値推定

観測によって天王星と比較星の明るさの比がわかったとき，比較星の明るさを別の方法で決めることができれば，天王星の明るさを決定することができる(図 3.10)．本研究は，天王星と同一のフレームに写っていた 3 つの恒星のアンサンブルを比較星として，天王星の明るさを決定した．比較星とした 3 つの恒星の明るさは Tycho-2 カタログにある値を用いた(表 3.2)．

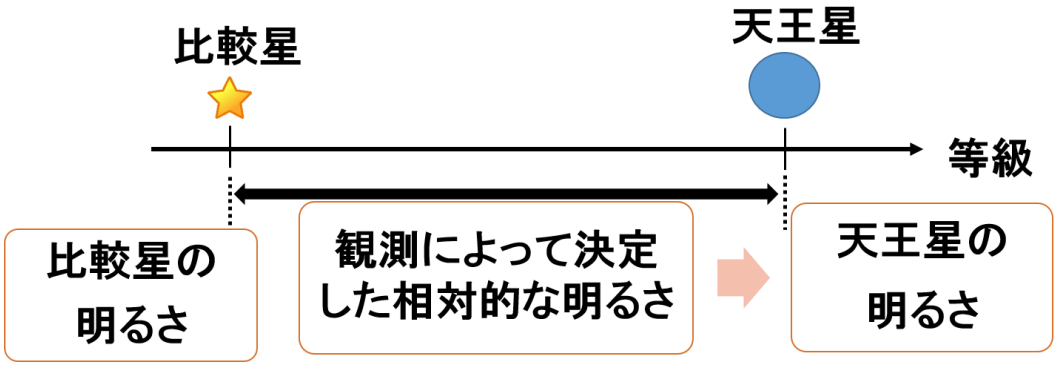

図 3.10　明るさの絶対値推定

表 3.2　測光に使った恒星

恒星	恒星名	V 等級
A	GSC 0621 00207	8.461±0.016
B	GSC 0621 00170	7.586±0.011
C	GSC 0621 00047	9.292±0.030

3.6　アンサンブル測光

本研究では，天王星と同一のフレーム上に写っていた 3 つの恒星のアンサンブルを比較星として相対測光をおこなった．3 つの恒星をアンサンブルした仮想的な比較星の明るさは 7.04±0.009 等級である．

3.7　天王星の明るさ

図 3.11 は，アンサンブルした比較星を用いて決定した天王星の等級である．　51 枚の撮像を 1 セットとして各セットについて平均をとって求めた明るさを表 3.3 に示す．セットによって明るさが異なっているように見えるが，これは天王星の明るさが変動したのか，あるいは観測の誤差によるものであるのかはわからなかった．

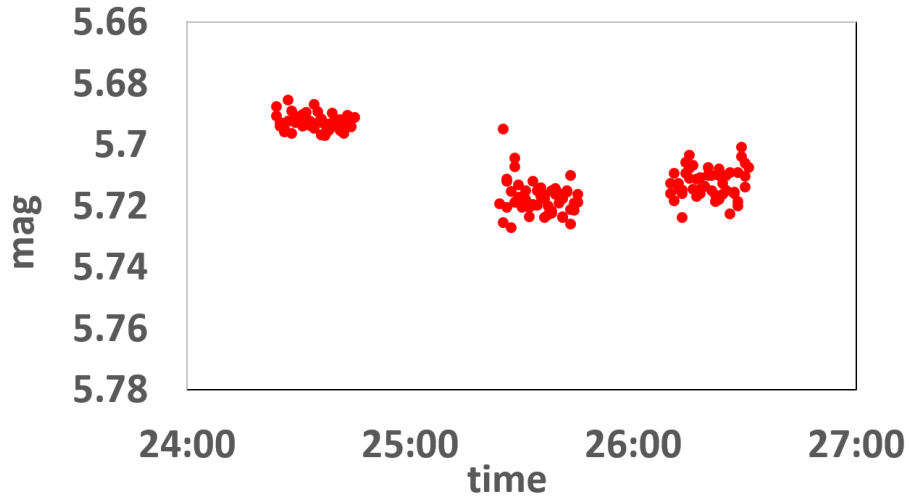

図 3.11　　天王星の等級．縦軸は天王星の等級、横軸は時間である．

表 3.3　　明るさの平均

セット	1	2	3	全体
明るさの平均	5.692	5.717	5.712	**5.707**

第四章　天王星アルベドの時間変化

4.1　距離と満ち欠けの補正

地球で観測される天王星の明るさは，天王星のアルベドだけでなく、天王星と太陽の間の距離、天王星と地球の間の距離、天王星の満ち欠けによっても変化する．したがって，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．距離と満ち欠けの補正は, Hammel and Lockwood (2007) に従って，次の式を用いておこなった．

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

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 は観測時の天王星と太陽の距離, d_0は基準となる天王星と太陽の距離(19.191AU), aは観測時の天王星と地球の距離, a_0は基準となる天王星と地球の距離(18.191AU), fは地球から見た天王星ディスクの太陽光に照らされている部分の割合である．観測をおこなった 2017 年 10 月 25 日の d, a, f は NASA JPL HORIZONS System (https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi) を使用して算出した．補正に用いた値は表 4.1 の通り．

表 4.1　補正に用いたパラメータ．

d (AU)	19.910
a (AU)	18.921
f (%)	99.999

4.2　天王星アルベドの変動

2017 年 10 月 25 日に観測された天王星の明るさについて，距離と満ち欠けの補正をおこなって 5.542±0.022 等級という値を得た．

図 4.1 は先行研究(Hammel and Lockwood 2007, 戸田 2015, 中村 2016)と本研究の結果をまとめてプロットしたものである． 2017 年 10 月の天王星は北半球の夏至に向かう季節にあり，本研究で得られた光度は，太陽直下点の緯度が同程度の時期に観測された天王星の光度とほぼ同様のものであった．

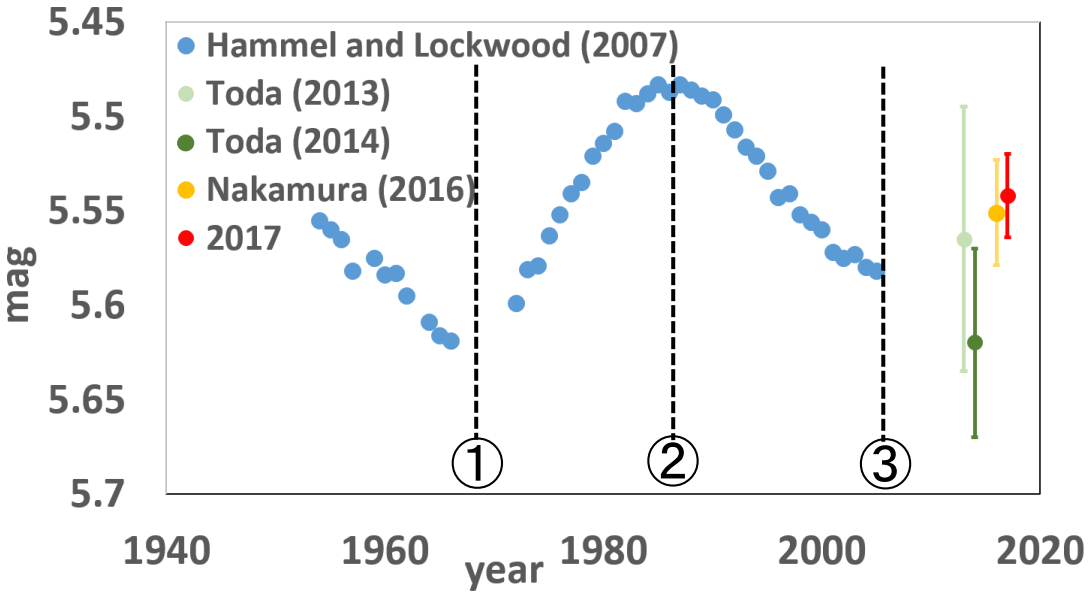

図 4.1　天王星光度の変化．明るさは距離と満ち欠けの補正後のもの．縦軸は距離の違いを補正した天王星の等級，横軸は時間．①は秋分，②は冬至，③は春分を表す．青は Hammel and Lockwood (2007)，薄緑は戸田（2013)，緑は戸田（2014)，黄は中村（2016)，赤は本研究．

第五章　まとめ

2017 年 10 月 25 日に岡山大学天文台で天王星の測光観測をおこなった．観測によって得られた 153 枚の画像データを解析し，天王星の明るさを 5.707±0.022 等級と推定した.推定された天王星の明るさは，太陽直下点の緯度が同程度の時期に観測された天王星の明るさとほぼ同様のものであった.

謝辞

本研究をおこなうにあたり，ご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.

同研究室の先輩方には，研究を進める上で様々な相談に乗っていただきました. 同研究室の同期の皆さまには様々な面で本研究を支えていただきました. ありがとうございました.

参考文献

de Pater, I, and J. J. Lissauer (2010) Planetary Sciences second edition, Cambridge University Press.

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

ImageJ
http://slittlefair.staff.shef.ac.uk/teaching/phy217/lectures/instruments/L13/index.html

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

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

すばる画像解析ソフト マカリ
https://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html.ja

戸田晃太（2015） 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　修士論文.

中村小百合（2017） 天王星の測光観測:アルベドの長期変動と短期変動の解析.岡山大学理学部地球科学科　卒業論文.