

ピリカ望遠鏡偏光観測による
火星大気突発現象検出手法の確立

横田 駿太郎
学生番号 02150345

北海道大学 理学部 地球惑星科学科
惑星宇宙グループ

指導教官: 佐藤 光輝

2019年1月31日

概要

火星大気は地球と比べて薄く温度も低い特徴を持つが、時に惑星規模の擾乱が見られる。代表的なものは、全球にわたってダストが巻き上げられるダストストームが挙げられ、これまでに探査機、地上観測共に多くの研究が行われてきた。一方、偏光観測は天体表面の粒子の情報を得るのに適した方法である。先行研究では、火星の偏光観測によって、火星大気の状態が変化した際に偏光度が変化することが示されている。地上からの偏光観測は、広範囲に渡る粒子種や分布の変化を知ることができ、探査機による観測をカバーすることが期待できる。突発的な現象の検出が地上から可能になれば、その現象を長期間追うことによって、ダストストーム後の粒子がどのように沈降していくかなど、十分に検討されていない火星大気粒子の動きを追えることが期待される。全球的な粒子分布と粒径の変化は、火星大気ダイナミクスを知る重要な手がかりとなる。

本研究では2018年7月27日-12月17日において、ピリカ望遠鏡を用いて複数の波長帯で火星の偏光観測を行った。この観測中、火星を周回する探査機 Mars Express (MEx) によって、赤道域の Arsia 火山付近から西に長く伸びる雲が観測された。この論文では、偏光観測による火星大気モニタリング手法を確立し、将来発生するダストストームにおける粒子巻き上げ・沈降プロセスと大気ダイナミクスを明らかにするため、MEx が観測した雲を検出することを一つの目標として解析を行った結果を示す。

目次

1	Introduction	3
1.1	火星の概要	3
1.2	粒子による偏光	3
1.3	火星の偏光観測	5
1.4	Mars Express で観測された雲	8
1.5	研究目的	10
2	Observation & Method	11
2.1	ピリカ望遠鏡	11
2.2	MSI(Multi-Spectrum Imager)	12
2.3	火星観測	13
3	Analysis	16
3.1	iraf による一次処理	16
3.2	MATLAB による処理	17
3.2.1	模擬画像作成	17
3.2.2	位置合わせ	17
3.2.3	緯度マスクの作成と適用	19
3.2.4	Stokes parameter の計算	20
4	Results	22
5	Discusstion	38
6	Summary & Future works	40
7	Aknowledgements	41
8	References	41

1 Introduction

1.1 火星の概要

火星は地球型惑星の1つであり、地球の外を公転する外惑星である。表(1)に火星の概要を示す。

表 1: 火星の諸元 [9]

	火星	地球
赤道半径 [km]	3396	6378
公転周期 [yr]	1.881	1
自転周期 [h]	24.62	23.93
軌道長半径 [AU]	1.5237	1
軌道離心率	0.0934	0.0167
軌道傾斜角 [deg]	1.849	0.002

軌道要素の性質として、地球と比べ離心率が大きいことにより、受け取る太陽放射の年較差が大きくなる。北半球の夏が遠日点、南半球の夏が近日点にあたるため、半球の季節変化は地球よりも大きくなる。

火星大気中には数 μm 程度のダストが常時存在しており、赤外に吸収帯を持つため大気を直接加熱するなど、火星の放射平衡において重要な役割を持つ [10]。このダストが巻き上げられるとダストストームが発生する。ダストストームが発生時は火星大気の光学的厚みが平常時の数倍に増大し、太陽光のほとんどを遮るため、火星表面でのローバーの活動に影響を与えることがある。ダストストームの規模は数日で収まる局所的なものから数か月持続する全球を覆うまで発展するものまで存在する。全球的なダストストームの発生は南半球の夏に集中しているが、全く起きない年もあるなど、未だにメカニズムが解明されておらず、様々なモデルが提唱されている。2018年6月には、全球的なダストストームが発生し、7月頃から終息が始まった。

1.2 粒子による偏光

光を表す電磁波の振動方向は、光の進行方向に垂直である。この振動方向が特定の方向に偏っている状態を偏光という。太陽光など、黒体放射で表されるような光は、様々な振動方向を持つ光が均等に集まっているため、絶えず振動方向がランダムに変化している。このような自然光の状態を、無偏光という。一方、太陽光を反射している惑星の光は、惑星表面、あるいは大気中の粒子によって散乱された太陽光を含むため、偏光している。偏光の強度、すなわち散乱強度は方向と波長への依存性を持つ。地球大気で見られるレイリー散乱は粒子サイズが波長と同程度の際に発生する、等方的な散乱である。もう一つの代表的な散乱であるミー散乱では、波長の十倍程度大きい粒子が前方散乱を起こす。このように散乱の度合いは粒子の形状、サイズ、組成に大きく関係している。

粒径 D の球状粒子の単位立体角当たりの散乱角 θ 当たりのミー散乱の散乱強度 I_θ は以下の式

(1) で表される. 散乱角 θ と位相角 α には, $\theta = \pi - \alpha$ の関係がある.

$$I_\theta = \frac{I_0 \cdot \lambda^2}{8\pi} * (i_1 + i_2) \quad (1)$$

i_1, i_2 は電場の振動方向が垂直, 水平である直線偏光成分を表す.

$$i_1 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \{a_n \cdot \pi_n(\cos \theta) + b_n \cdot \tau_n(\cos \theta)\} \right|^2 \quad (2)$$

$$i_2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \{a_n \cdot \tau_n(\cos \theta) + b_n \cdot \pi_n(\cos \theta)\} \right|^2 \quad (3)$$

式中の $\pi_n(\cos \theta), \tau_n(\cos \theta)$ は Legendre 陪関数 P_n^1 を用いて式 (4), (5) で表される.

$$\pi_n(\cos \theta) = \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \quad (4)$$

$$\tau_n(\cos \theta) = \frac{d}{d\theta} \{P_n^1(\cos \theta)\} \quad (5)$$

a_n, b_n は Riccati-Bessel 関数 $\phi_n(x), \zeta_n(x)$ とその導関数を用いて式 (6), (7) で表される. $x = \frac{\pi D}{\lambda}$ は粒径パラメータ, m は粒子の相対屈折率を表す. また, $y = mx$ である.

$$a_n = \frac{\phi_n(x) \cdot \phi_n'(y) - m \cdot \phi_n(y) \cdot \phi_n'(x)}{\zeta_n(x) \cdot \phi_n'(y) - m \cdot \phi_n(y) - m \cdot \phi_n(y) \cdot \zeta_n'(x)} \quad (6)$$

$$b_n = \frac{m \cdot \phi_n(x) \cdot \phi_n'(y) - \phi_n(y) \cdot \phi_n'(x)}{m \cdot \zeta_n(x) \cdot \phi_n'(y) - \phi_n(y) - m \cdot \phi_n(y) \cdot \zeta_n'(x)} \quad (7)$$

直線偏光とは電場の振動方向を基準面に沿って 2 つに分解したとき, 位相差無しで振動している状態を指す. そのため直線偏光している電磁波の振動方向いつも同じ面にある. 2 つに分解した振動の位相差が合わない場合, 電磁波の振動方向は時間的に変化する. この状態を楕円偏光といい, 特に位相差が $\pi/2$ の状態を円偏光という. 光の偏光を表すパラメータとしては, ストークスパラメータがよく用いられる. ストークスパラメータは全フラックス I , 直線偏光成分 Q, U , 円偏光成分 V から成る. Q は垂直成分に対する水平成分の優位性を, U は 45° 傾いた基準面における垂直成分に対する水平成分の優位性を示す. ストークスパラメータの意味を視覚的に表したものが以下の図 (1) である.

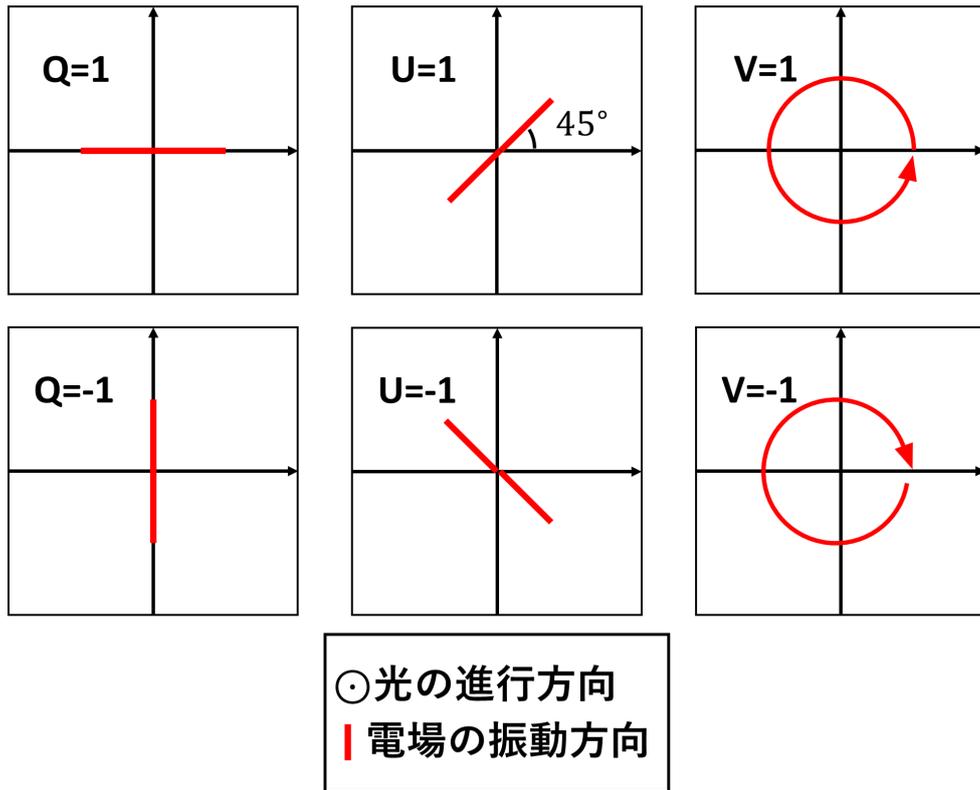


図 1: ストークスパラメータと電場の振動方向

1.3 火星の偏光観測

火星の偏光観測は 1929 年の Lyot による観測以降多数行われている。(Ebisawa,1993[1]) は、地上からの長期間にわたる観測が行われており、地表とダスト、雲の偏光度の違いとダストストーム発生時の偏光度の変化をまとめている。図 2 のプロットの内、 \times はダストの影響を受けている地域を表しており、地表面と比較して顕著な偏光度の変化が見られる。white clouds を表す \odot のプロットは他領域と比較して高い偏光度を示している。

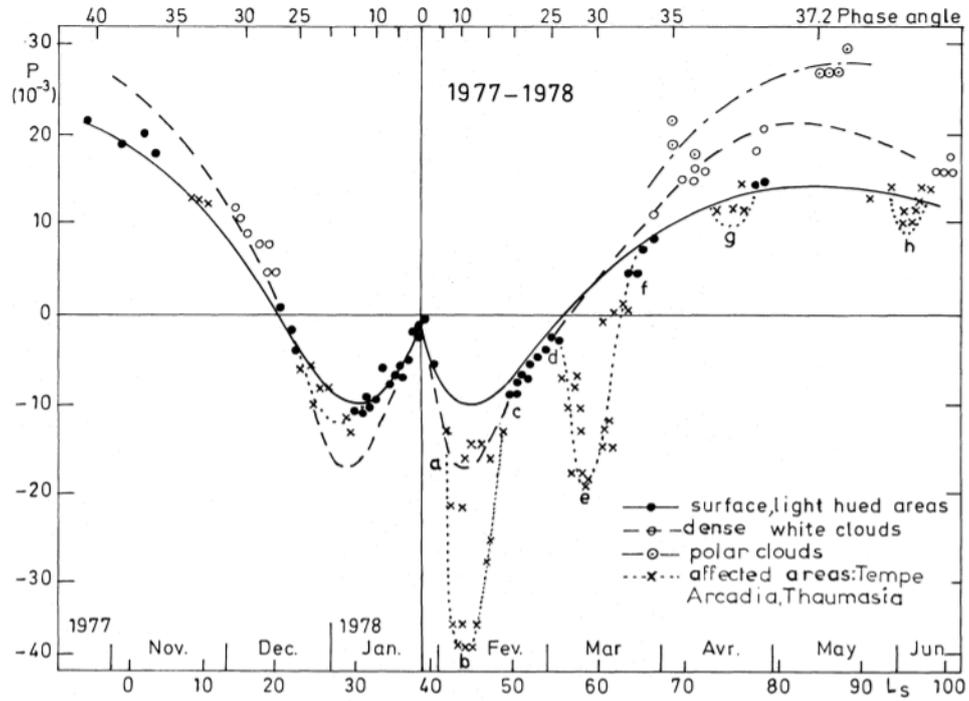


図 2: 地上からの偏光観測による火星地表の偏光度変化

2003 年の火星接近時にはハッブル宇宙望遠鏡による火星の偏光観測が行われている [5]. この観測では、雲領域を除外した部分と全球から求めた偏光度の違いが見られている他、紫外域で見られる半透明の雲で 3%の強い偏光が検出されている.

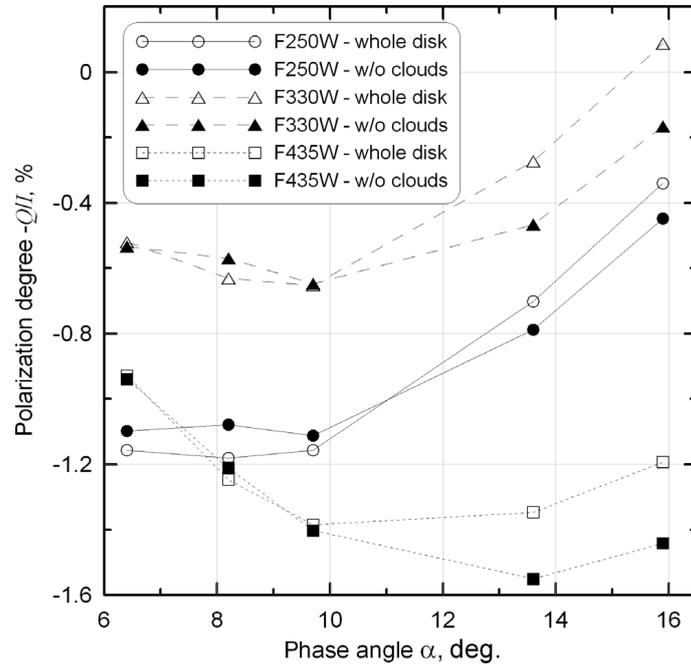


図 3: ハッブル宇宙望遠鏡による紫外域での雲を除いた領域と全球の偏光度の変化

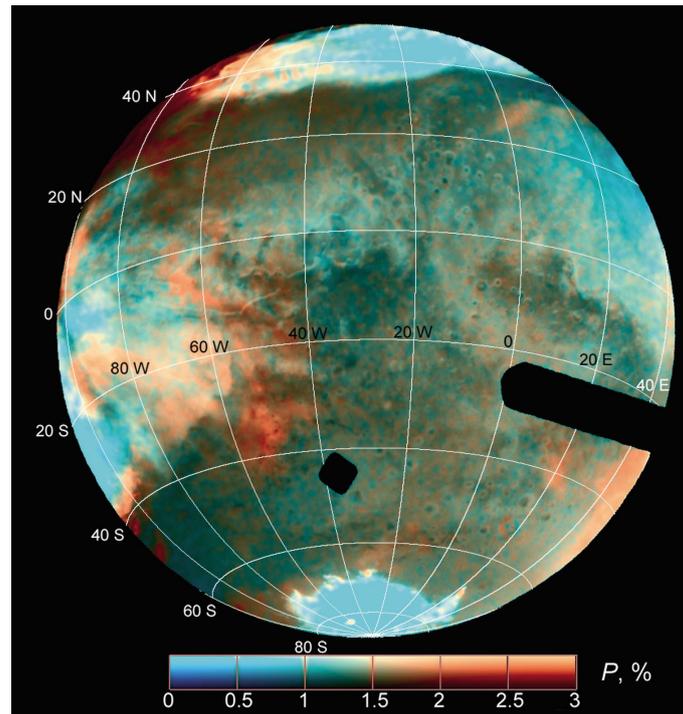


図 4: ハッブル宇宙望遠鏡による偏光観測で得られた偏光度マップ

1.4 Mars Express で観測された雲

火星周回軌道上の探査機 Mars Express(以下 MEx) は 2003 年から運用されており、様々なデータを取得しているが、このほかに VMC というカラーカメラを搭載しており、写真を提供している。図 (5) の写真は、2018/09/12 に取得された雲である。この雲は赤道近くのアルシア火山付近から西に向かって最大で 1500 km 程度の長さまで成長し、可視で見られる雲としては規模が大きい。MEx ではこの地域で同様な雲を過去に数回観測しており、火山斜面に沿った上昇気流によって水蒸気の凝結が発生していると考えられている。[8]

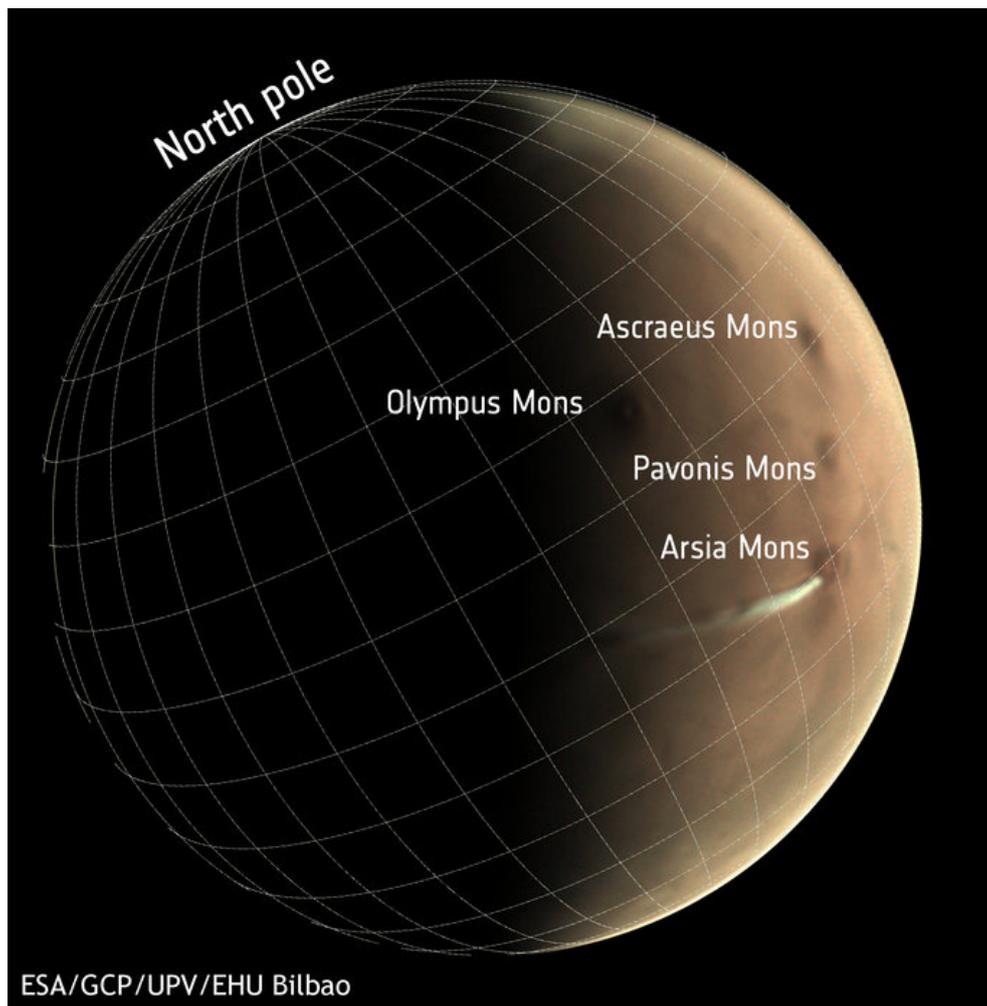


図 5: Mars Express によって観測された雲 (2018/09/21)

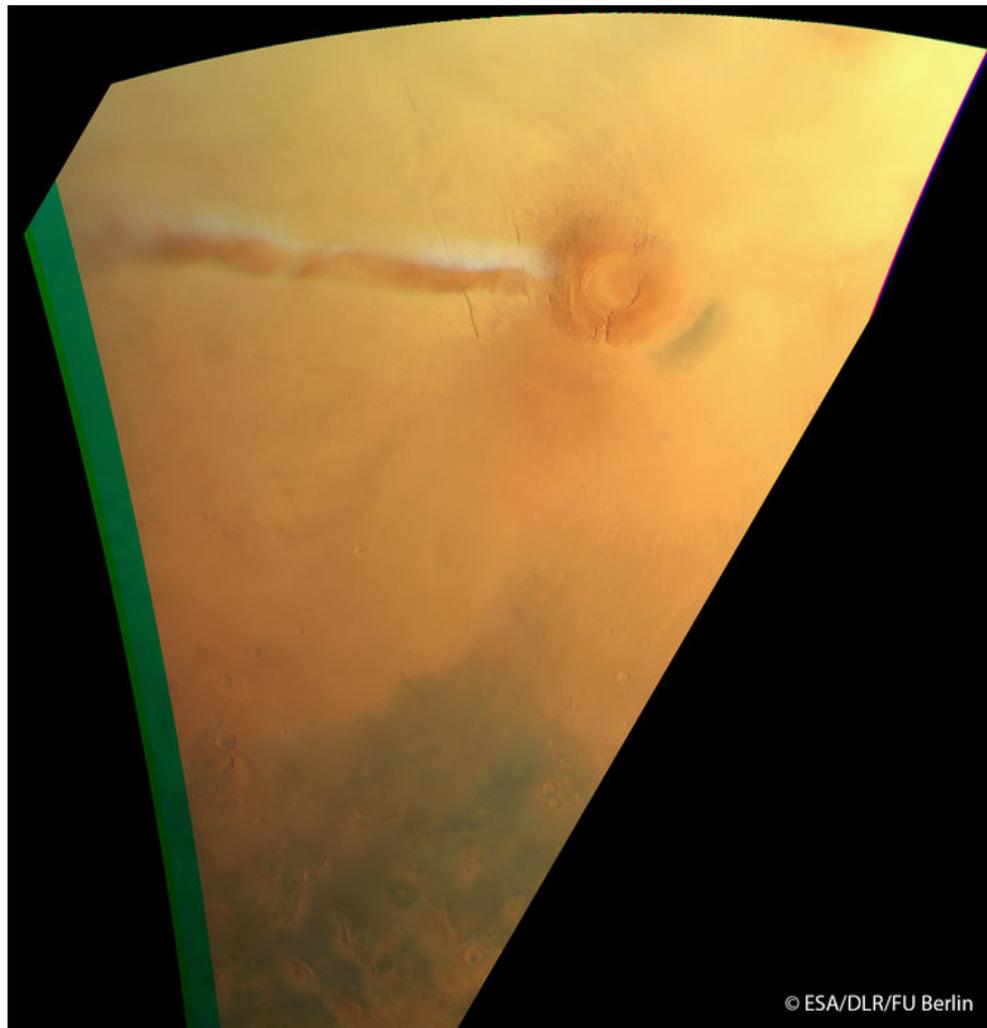


図 6: Mars Express によって観測された雲 (2018/09/12)

1.5 研究目的

偏光を用いて観測することで、撮像観測では得られない粒子の特性についての情報を得ることができる。地上観測は探査機がカバーできない全球的な動きについて連続的な観測をできる点に強みを持つ。とくにピリカ望遠鏡は、このクラスの地上望遠鏡として豊富なマシンタイムを誇り、長期にわたる時間分解能の高い観測を行うことができる。将来的には、偏光観測によるモニタリング観測によって、火星の気象現象の一部始終を追い、その発生から終息までの粒子の動態を追うことで火星のダイナミクス解明へと発展させることが期待できる。この研究では、モニタリング観測の手法を確立するために、火星大気で発生する突発的な気象現象、特に MEx が観測した長い尾を持つ雲を、偏光観測によって検出することを試みる。

2 Observation & Method

2.1 ピリカ望遠鏡

ピリカ望遠鏡は北海道大学が有する光学赤外線天体望遠鏡である。主鏡直径は1.6 mで、惑星観測を目的として設置された望遠鏡としては最大級の大きさを持つ。望遠鏡は北海道名寄市に設置されており、東経145° 北緯44°、標高151 mに位置する。表2に望遠鏡の仕様を示す。

表 2: ピリカ望遠鏡仕様

光学系	リッチー・クレチアン
焦点	カセグレン × 1, ナスミス × 2
主鏡有効径	1600 mm
合成焦点距離	19238 mm (F/12.0)
視野 (カセグレン)	直径 20 arcmin



図 7: 天文台外観



図 8: ペリカ望遠鏡

2.2 MSI(Multi-Spectrum Imager)

MSI(Multi-Spectrum Imager) は, ペリカ望遠鏡カセグレン焦点に設置された観測装置である. MSI は EMCCD カメラと液晶可変フィルターの組み合わせによって素早くマルチスペクトル撮像を行うことができるユニークな装置である. この他, MSI には本観測で行う, ウォラストンプリズムと広帯域フィルターを用いた偏光観測ことができる. 表 3 に装置の仕様を示す.

表 3: MSI 仕様

波長域	360-1050 nm
視野	3.3×3.3 arcmin(0.389 arcsec / pixel)
フィルター	
・液晶可変フィルター (VIS)	400-720 nm($\Delta\lambda = 10$ nm)
・液晶可変フィルター (SNIR)	650-1100 nm($\Delta\lambda = 10$ nm)
・狭帯域フィルター	365,656,777,889,1010 & 1100 nm
・広帯域フィルター	U,B,V,Rc,Ic
検出素子	512 × 512pixel EMCCD
最大フレームレート	0.031s(EMCCD mode),0.122 s(NormalCCD mode)

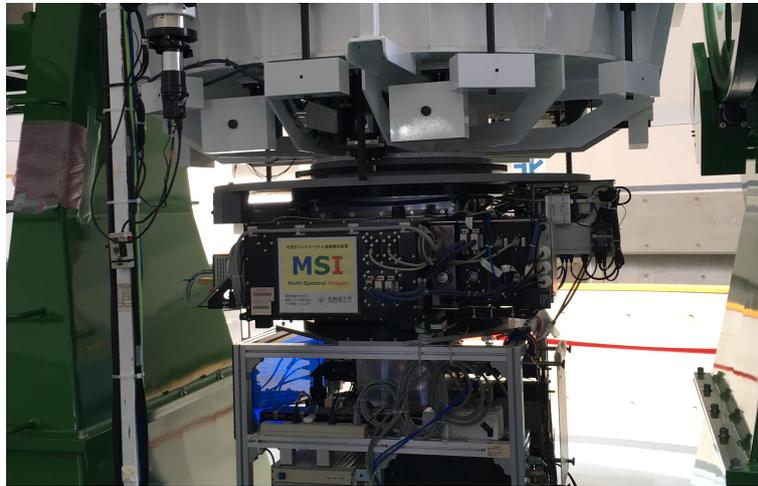


図 9: 装置外観

2.3 火星観測

火星の偏光度を測定するため、本研究ではウォラストンプリズムと広帯域フィルターを用いた観測を行った。偏光観測に使用できるフィルターは B,V,Rc,Ic であるが、V,Rc,Ic バンドでは最短露光時間でもカウントが飽和して正確なデータが取得できないため、これらのフィルターを用いる際には、主鏡バッフル部分に光量絞りを目的としたバッフルマスクを取り付けて観測した。また、装置偏光を補正するためのパラメータを取得するために無偏光標準星、強偏光標準星を2つずつ各バンドで観測した。フラットフレームの取得にはドーム内に取り付けられたフラット板とフラットランプを利用した。火星画像のデータの形式は 200-250 枚の動画であり、半波長板の回転角度でそれぞれ 1 枚取得した。これを 1 セットとして、1 回の観測では天候が許す限りこれを 5 セット行った。ま

た、装置偏光とその偏光方向を測定するために、偏光度が既知である無偏光標準星と強偏光標準星の偏光度を測定した。

観測期間中の位相角の変化を図 10 に、観測直下点経度の変化を図 11 に示す。

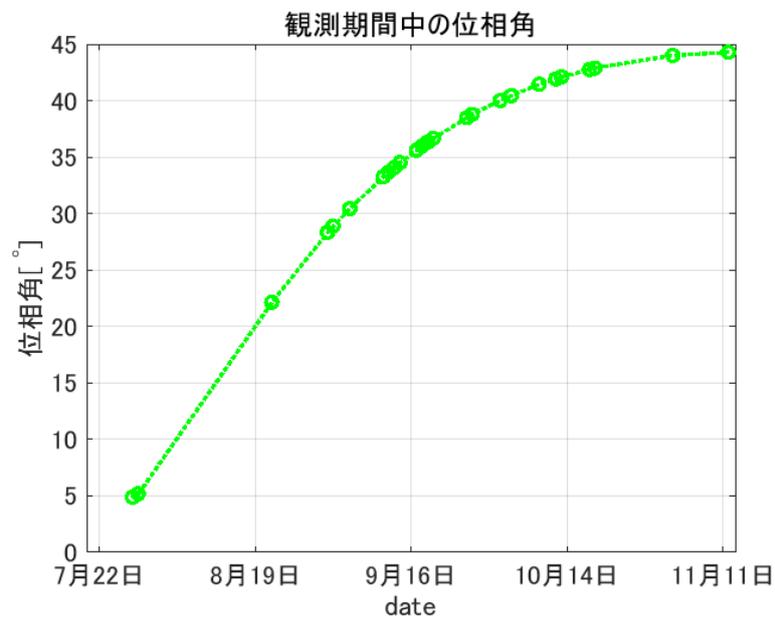


図 10: 観測期間中の位相角の変化

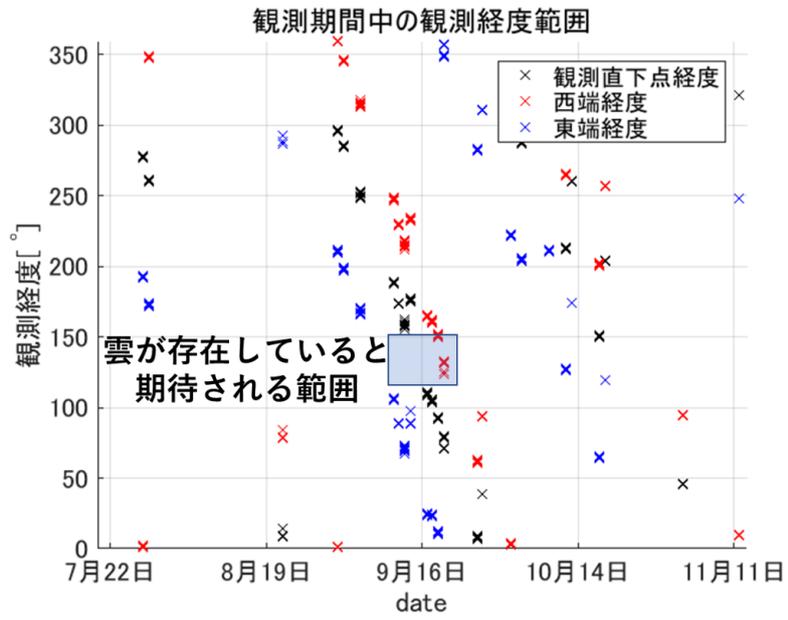


図 11: 観測期間中の観測経度

表 4 に観測の概要を示す.

表 4: 観測概要

観測日	仕様バンド	火星視直径	位相角
7/26,7/27	B,V,Rc,Ic	24.2 arcsec	4.8, 4.7°
7/28	B	24.2 arcsec	4.8°
7/29	B,V,Rc,Ic	24.1 arcsec	5.0°
8/22	B	22.5 arcsec	21.8°
8/27	B,V,Rc,Ic	21.7 arcsec	25.1°
9/1-9/3	B	20.9-20.5 arcsec	28.0 – 29°
9/5,9/11	B	20.2,19.1 arcsec	30.2, 33.0°
9/12	B,V,Rc,Ic	18.9 arcsec	33.5°
9/13,9/14	B	18.8,18.6 arcsec	33.9, 34.3°
9/15	V,Rc,Ic	18.4 arcsec	34.7°
9/16-9/20	B	18.2-17.6 arcsec	35.1 – 36.5°
9/26,9/27	B,V,Rc,Ic	16.6,16.4 arcsec	38.4, 38.7°
10/2-10/4	B,V,Rc,Ic	15.7-15.4 arcsec	39.9 – 40.4°
10/8	B	14.8 arcsec	41.2°
10/9	B,V,Rc,Ic	14.7 arcsec	41.4°
10/12	B	14.2 arcsec	41.9°
10/13,10/18	B,V,Rc,Ic	14.1,13.5 arcsec	42.0, 42.7°
10/22,10/23	B,V,Rc,Ic	13.0,12.9 arcsec	43.2, 43.3°
11/2	B	11.8 arcsec	44.0°
11/8	B,V,Rc	11.2 arcsec	44.2°
11/12	B,V,Rc,Ic	10.8 arcsec	44.3°

3 Analysis

本研究の解析では, 取得した画像データの一次処理に iraf を, それ以降の処理に MATLAB を利用した. この章では解析の流れを記述する.

3.1 iraf による一次処理

iraf による一次処理では観測装置由来のムラを補正する. 観測で取得された画像データには, bias と呼ばれるカウント値が観測対象からくる光による信号に足されているほか, 各ピクセル間の感度のムラが残っている. bias を除くために, bias 補正を, ピクセル間の感度ムラを補正するためにフラット補正を行う. バイアス補正では, CCD に光を阻止に当てない状態で最短露出時間で取得した bias

フレームと呼ばれる画像 10 枚のカウント, 中央値でスタックしたフレームを作成し, 取得した火星画像から引き算を行うことで bias を除く. フラット補正では CCD が飽和しない程度に露出時間を調整した上で, フラットランプの光を当てたドーム内に設置された拡散版に望遠鏡を向けて取得したフラットフレームを使用する. 半波長板の各回転角度毎に 5 枚ずつ取得したフラットフレームを bias を引いた後に中央値でスタックし, 規格化を行う. 規格化後のフラットフレームで bias 補正後の画像に割ることで感度ムラが補正される. 以上の操作をピクセル毎のカウントの式で表すと以下のようになる.

$$\text{reducedImage} = \frac{\text{rawImage} - \text{biasimage}}{\text{flatImage} - \text{biasimage}}$$

3.2 MATLABによる処理

3.2.1 模擬画像作成

一次処理を施した画像に対し, 火星の緯度, 経度情報を取得するため, 観測時のパラメータから火星の模擬画像を作成した. パラメータの取得には太陽系天体の運行を表示する NASA の Web サイト, HORIZONS(<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>) を利用した. 取得したパラメータは, 火星-地球間の距離, 太陽直下点の経緯度, 観測直下点の経緯度, 視直径, 位相角, 見かけの地軸の傾きである. 緯度, 経度で表される火星中心を原点とする極座標系から, CCD の受光面と受光面に垂直な軸からなる xyz 座標系への変換を行う. 各ピクセル毎の緯度, 経度を計算し, 原点からピクセルに対応する経緯度へ向かうベクトル P と, 原点から太陽へ向かうベクトル L_s の内積と, 地球へ向かうベクトル L_e との内積がどちらも正になるピクセルの値を 1, それ以外を 0 にすることで, CCD 上で火星にあたる部分のみ 1 の値を持つ模擬画像を作成した. 模擬画像の例を図 12 に示す.



図 12: 位置合わせのための模擬画像

3.2.2 位置合わせ

作成した模擬画像を用いて, 一次処理済みの画像の位置合わせを行った. 一次処理済みの画像はウォラストンプリズムで上下分割された像が写っているため, ピクセルサイズで二つに分けた. 分かれた常光線, 異常光線の画像に対し, 作成した模擬画像を水平, 垂直にそれぞれ 1 ピクセルずつシフ

トさせながらカウント値の合計を求め、合計が最も高くなったシフト量を適用して画像の中心を合わせた。シフト量とカウント値の関係を以下の図 13, 図 14 に示す。

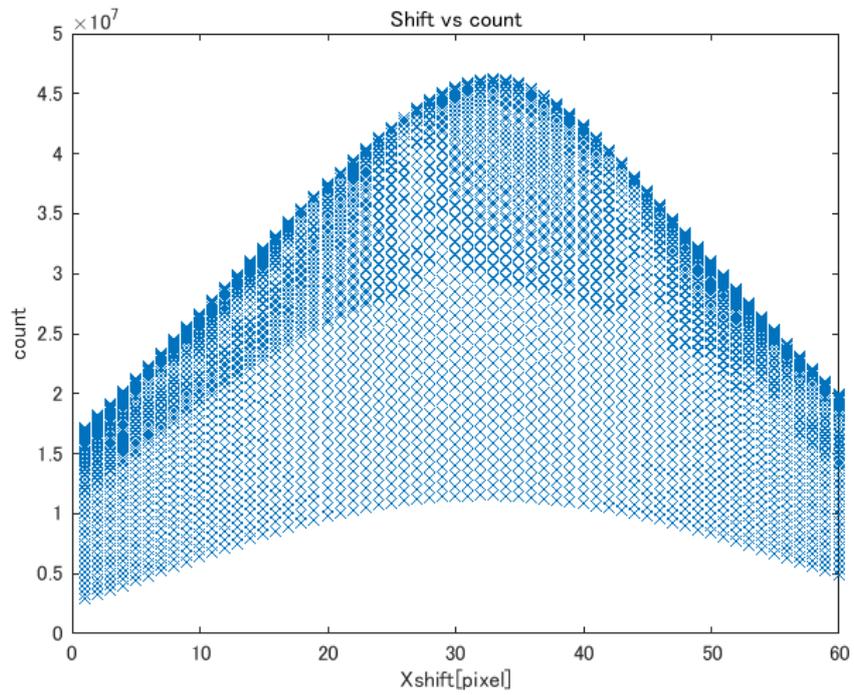


図 13: x 軸のシフト量とカウント値の関係

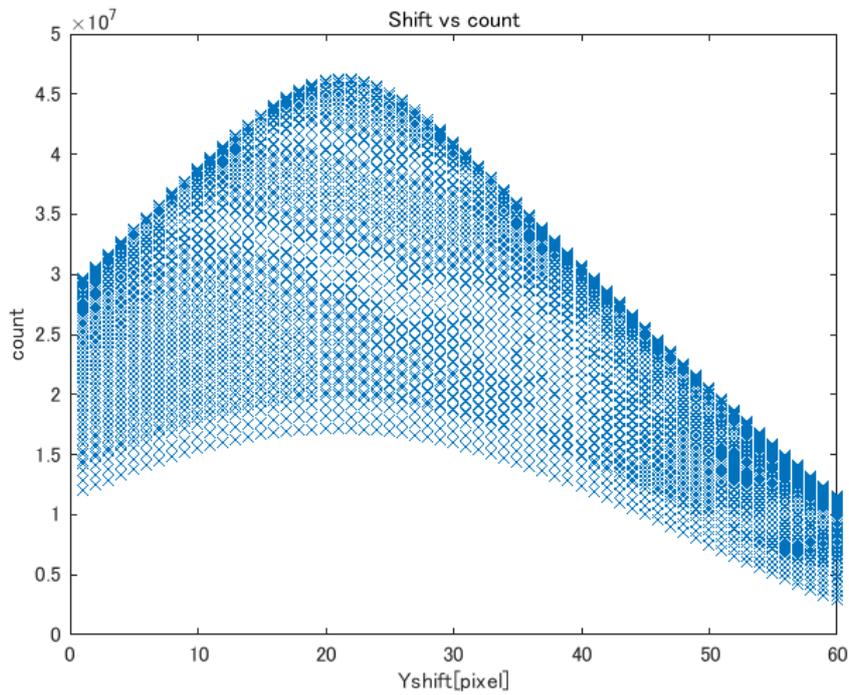


図 14: x 軸のシフト量とカウント値の関係

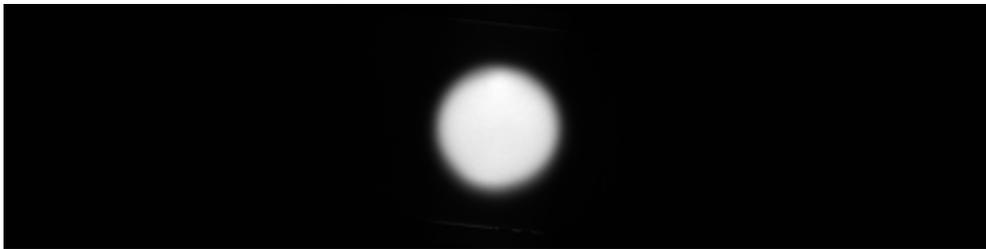


図 15: 位置合わせ後の火星画像

3.2.3 緯度マスクの作成と適用

模擬画像作成に使う経緯度を利用して特定の緯度のみを表示する緯度マスクを作成する。緯度の分割幅は20度毎とした。惑星のリムでは、偏光度が増大することが知られている。[[2]]。このリムによる影響を除くため、緯度マスクの半径の大きさは、火星半径の80%とした。作製した緯度マスクの例を図3.2.3。これらのマスクと位置合わせ済みの火星画像を掛け合わせ、カウントを積分した。緯度マスクを適用した火星画像を図17に示す。



図 16: 緯度マスクの例 北緯 10°-南緯 10°

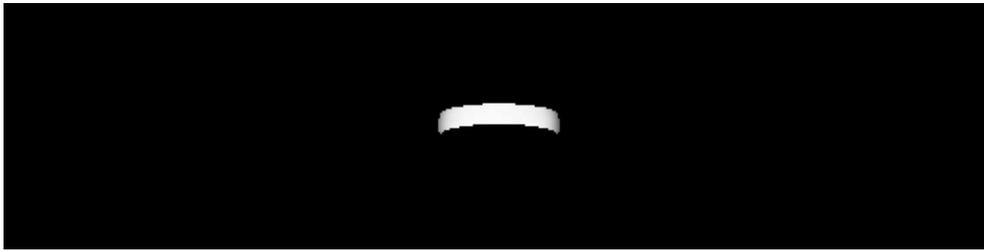


図 17: 緯度マスク適用後の火星

3.2.4 Stokes parameter の計算

緯度マスクを適用した火星画像のカウントを積分して、ストークスパラメータを計算した。計算に必要な装置偏光等の値は今回観測した偏光標準星の値ではなく、2017年に取得された値を用いた。以下では実際に行ったストークスパラメータの計算方法を記述する。 $I_e(x)$ を半波長板の回転角 x° での異常光線のカウントの値、 $I_o(x)$ を常光線のカウントの値とすると、以下の計算式(8),(9),(10),(11)から規格化されたストークスパラメータ $Q/I, U/I$ を計算できる。

$$R_q = \sqrt{\left(\frac{I_e(0)}{I_o(0)}\right) / \left(\frac{I_e(45)}{I_o(45)}\right)} \quad (8)$$

$$R_u = \sqrt{\left(\frac{I_e(22.5)}{I_o(22.5)}\right) / \left(\frac{I_e(67.5)}{I_o(67.5)}\right)} \quad (9)$$

$$\frac{Q}{I} = \frac{R_q - 1}{R_q + 1} \quad (10)$$

$$\frac{U}{I} = \frac{R_u - 1}{R_u + 1} \quad (11)$$

以下、 $q = Q/I, u = U/I$ とする。 q, u のランダム誤差 σ_q, σ_u はカウント値の誤差 $\sigma_{I_e(0,45,22.5,67.5)}, \sigma_{I_o(0,45,22.5,67.5)}$ を用いて以下の式(12),(13)のように表される。

$$\sigma_q = \frac{Rq}{(Rq + 1)^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{I_e(0)}}{I_e(0)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_o(0)}}{I_o(0)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_e(45)}}{I_e(45)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_o(45)}}{I_o(45)}\right)^2} \quad (12)$$

$$\sigma_u = \frac{Ru}{(Ru+1)^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{I_e(22.5)}}{I_e(22.5)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_o(22.5)}}{I_o(22.5)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_e(67.5)}}{I_e(67.5)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_o(67.5)}}{I_o(67.5)}\right)^2} \quad (13)$$

火星のように非常に明るい天体を短い露出時間で撮像した場合、カウント値のランダム誤差 σ_I は CCD のゲインを g とすると式 (14) と計算できる。

$$\sigma_I = \sqrt{gI} \quad (14)$$

式 (10),(11) で求めたストークスパラメータとそのランダム誤差は装置の偏光効率の影響を受けている。これを補正するために装置の偏光効率 p_{eff} で割る。このとき偏光効率の測定誤差によって系統誤差が出てくるため、誤差の伝搬に従って $\delta_{q'}$, $\delta_{u'}$ を式 (17),(18) で計算する。

$$q' = \frac{q}{p_{eff}} \quad (15)$$

$$u' = \frac{u}{p_{eff}} \quad (16)$$

$$\delta_{q'} = |q| \cdot \frac{\varepsilon_{p_{eff}}}{p_{eff}} \quad (17)$$

$$\delta_{u'} = |u| \cdot \frac{\varepsilon_{p_{eff}}}{p_{eff}} \quad (18)$$

MSI の B バンドでの装置偏光 $q_{instrument}$, $u_{instrument}$ はそれぞれ $1.110 \pm 0.030\%$, $0.486 \pm 0.032\%$ である。インスツルメントローテーターの回転と共にこの装置偏光が乗ってしまうため、以下の式 (21),(22) に従って補正を行う。 φ_q , φ_u はインスツルメントローテーターの回転角であり、式 (19),(20) のように、撮像の開始時刻と終了時刻での値の平均値を用いる。 $\varphi_{start}(x)$ は半波長板の回転角が x° の状態での撮像開始時のインスツルメントローテーターの角度、 $\varphi_{end}(x)$ は撮像終了時のインスツルメントローテーターの回転角度である。

$$\varphi_q = \frac{1}{4} \{ \varphi_{start}(0) + \varphi_{end}(0) + \varphi_{start}(45) + \varphi_{end}(45) \} \quad (19)$$

$$\varphi_u = \frac{1}{4} \{ \varphi_{start}(0) + \varphi_{end}(0) + \varphi_{start}(45) + \varphi_{end}(45) \} \quad (20)$$

$$q'' = q' - \{ q_{instrument} \cdot \cos(2\varphi_q) - u_{instrument} \cdot \sin(2\varphi_q) \} \quad (21)$$

$$u'' = q' - \{ u_{instrument} \cdot \sin(2\varphi_u) + u_{instrument} \cdot \sin(2\varphi_u) \} \quad (22)$$

装置偏光補正時に発生する系統誤差 δ_q , δ_u は式 (23),(24) で表される。

$$\delta_{q''} = \sqrt{\delta_{q'}^2 + \{ \varepsilon_{q_{instrument}} \cdot \cos(2\varphi_q) \}^2 + \{ \varepsilon_{u_{instrument}} \cdot \sin(2\varphi_q) \}^2} \quad (23)$$

$$\delta_{u''} = \sqrt{\delta_{u'}^2 + \{ \varepsilon_{q_{instrument}} \cdot \sin(2\varphi_u) \}^2 + \{ \varepsilon_{u_{instrument}} \cdot \sin(2\varphi_u) \}^2} \quad (24)$$

次に装置座標系のストークスパラメータを式 (26),(27) に従って、天球座標系への変換する。 $\phi_{instrument}$ は装置の位置角を表しており、観測時に記録された値を用いる。B バンドでの θ のオフセット θ_{offset} は $3.15 \pm 0.37 [^\circ]$ である (2017/01/23 測定値)。

$$\theta = \theta_{offset} - \phi_{instrument} \quad (25)$$

$$q''' = q'' \cdot \cos(2\theta) + u'' \cdot \sin(2\theta) \quad (26)$$

$$u''' = u'' \cdot \cos(2\theta) + u'' \cdot \sin(2\theta) \quad (27)$$

ランダム誤差は式 (28),(29), 系統誤差は式 (30),(31) で表される.

$$\sigma_{q'''} = \sqrt{\{\cos(2\theta) \cdot \sigma_{q''}\}^2 + \{\sin(2\theta) \cdot \sigma_{u''}\}^2} \quad (28)$$

$$\sigma_{u'''} = \sqrt{\{\sin(2\theta) \cdot \sigma_{q''}\}^2 + \{\cos(2\theta) \cdot \sigma_{u''}\}^2} \quad (29)$$

$$\delta_{q'''} = \sqrt{\{\cos(2\theta) \cdot \delta_{q''}\}^2 + \{\sin(2\theta) \cdot \delta_{u''}\}^2 + \{2 \cdot u''' \cdot \varepsilon_{\theta_{offset}} \cdot \frac{\pi}{180}\}^2} \quad (30)$$

$$\delta_{u'''} = \sqrt{\{\sin(2\theta) \cdot \delta_{q''}\}^2 + \{\cos(2\theta) \cdot \delta_{u''}\}^2 + \{2 \cdot q''' \cdot \varepsilon_{\theta_{offset}} \cdot \frac{\pi}{180}\}^2} \quad (31)$$

ランダム誤差と系統誤差の平方和を合成誤差 $\varepsilon_q, \varepsilon_u$ として, 式 (32),(33) のように計算する.

$$\varepsilon_{q''} = \sqrt{\sigma_{q''}^2 + \delta_{q''}^2} \quad (32)$$

$$\varepsilon_{u''} = \sqrt{\sigma_{u''}^2 + \delta_{u''}^2} \quad (33)$$

座標変換後のストークスパラメータ q''', u''' から偏光度 P を計算する.

$$P = \sqrt{q'''^2 + u'''^2} \quad (34)$$

P のランダム誤差 σ_P, δ_P は式 (35) で表される.

$$\sigma_P = \frac{\sqrt{(q''' \cdot \sigma_{q'''}^2) + (u''' \cdot \sigma_{u'''}^2)}}{P} \quad (35)$$

$$\delta_P = \frac{\sqrt{(q''' \cdot \delta_{q'''}^2) + (u''' \cdot \delta_{u'''}^2)}}{P} \quad (36)$$

P にはランダム誤差 σ_P によるバイアスがかかっていると考えられるため, これを補正する. 計算は式 (37) で表される.

$$P' = \sqrt{P^2 - \sigma_P^2} \quad (37)$$

エラーバーの大きさを求めるため, 合成誤差を式 (38) で計算する.

$$\varepsilon_P = \sqrt{\sigma_P^2 + \delta_P^2} \quad (38)$$

4 Results

解析によって得られた緯度毎の偏光度 P のプロットを図 18-22 に, 位相角 $30 - 45^\circ$ のプロットに対し, 線形フィッティングを行ったものを図 23-27 に示す. 図 18-27 におけるエラーバーの幅は 38 で求められる合成誤差を表す. フィッティングのカーブは, 本来であれば, 散乱強度を考慮したもの

が好ましいが、今回は雲が出現した前後の期間における変化を見る目的で、傾きを簡潔に評価するため2次の近似を用いている。分散はフィッティングの値との差から算出し、データのばらつきを表している。

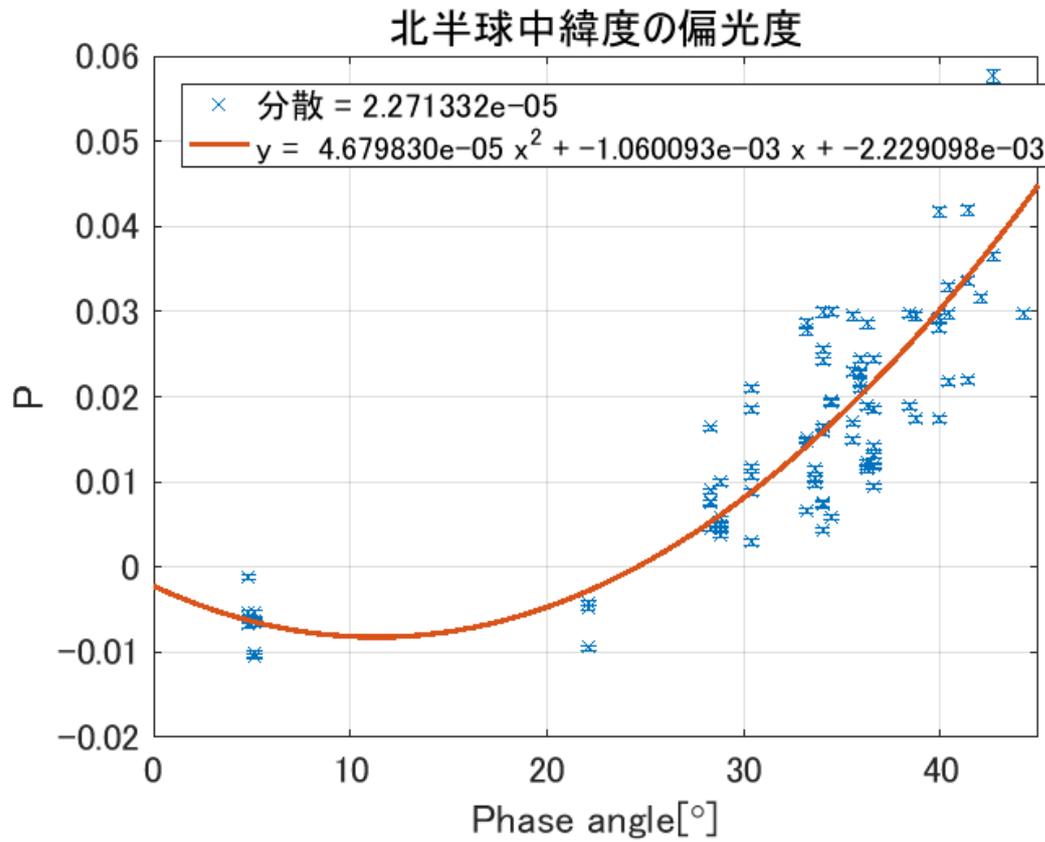


図 18: 北緯 50°-北緯 30° における位相角に対する偏光度

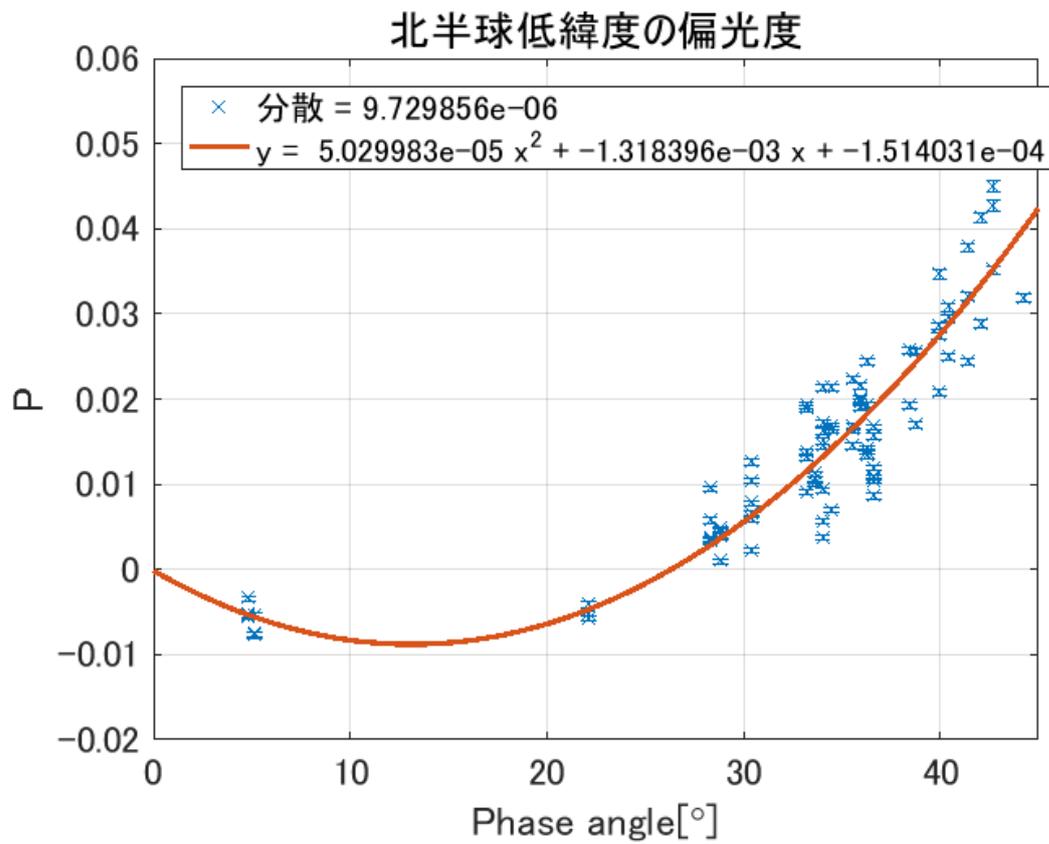


図 19: 北緯 30°-北緯 10° における位相角に対する偏光度

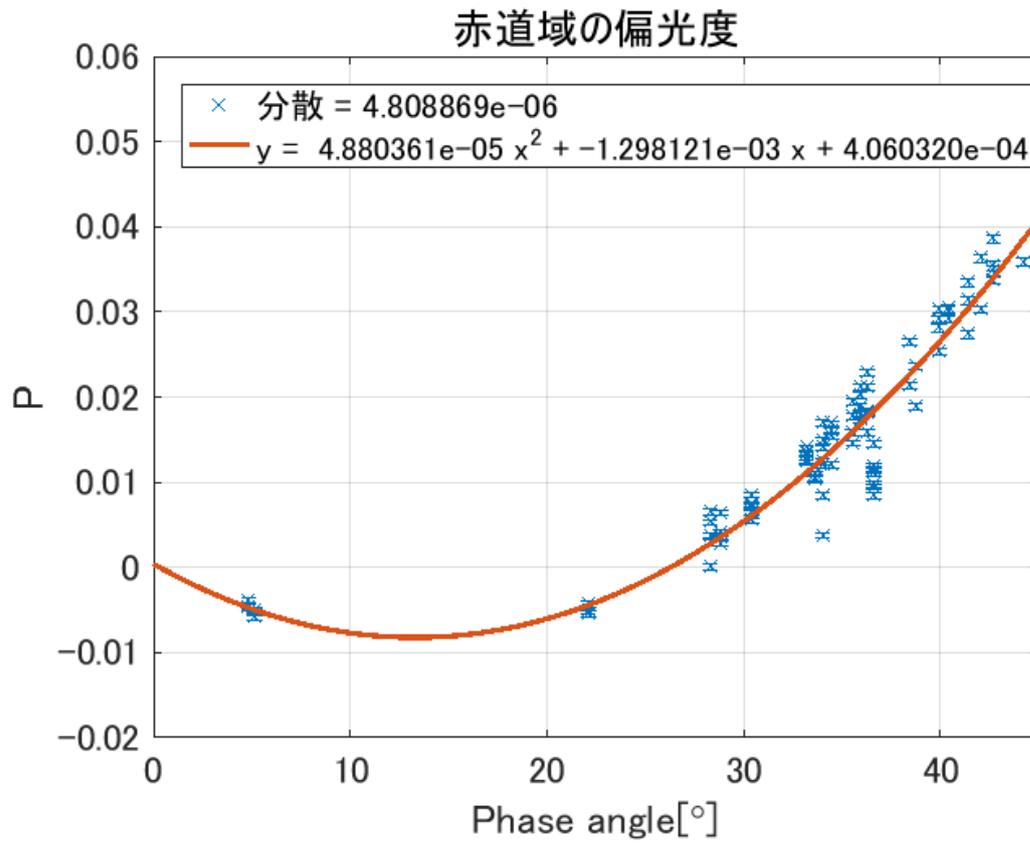


図 20: 北緯 10°-南緯 10° における位相角に対する偏光度

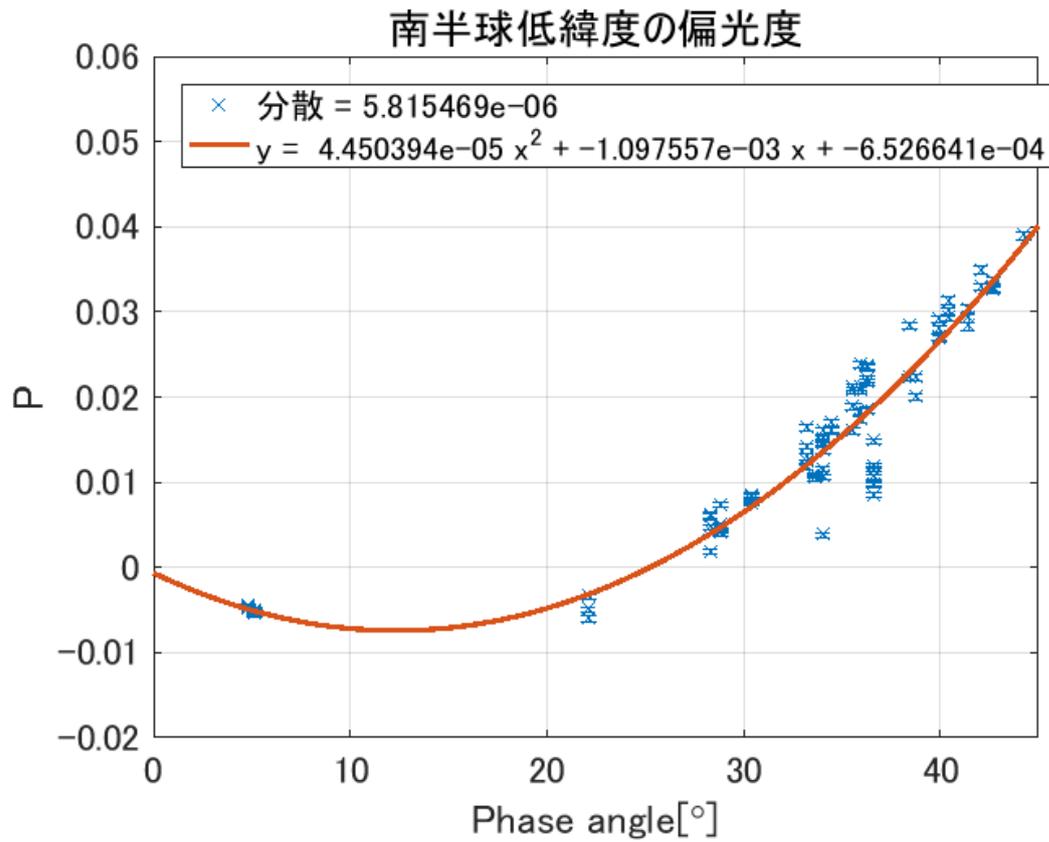


図 21: 南緯 30°-南緯 10° における位相角に対する偏光度

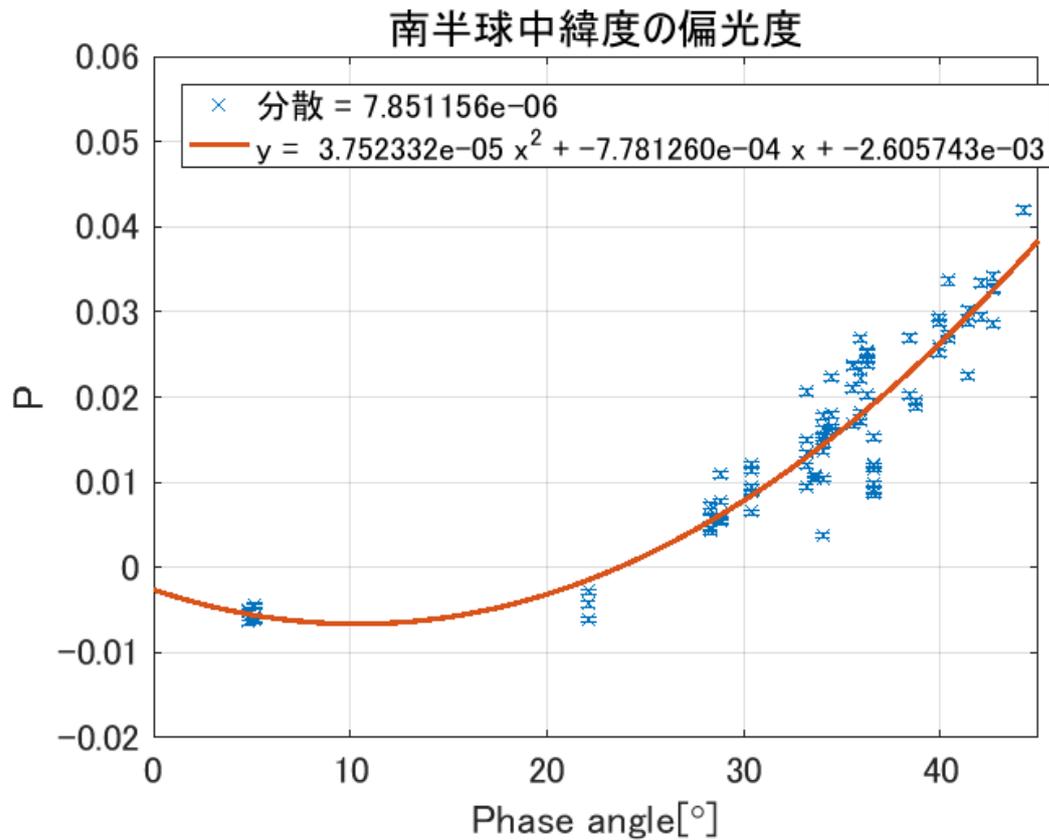


図 22: 南緯 50°-南緯 30° における位相角に対する偏光度

フィッティングカーブの x^2 の値を比較すると、赤道に近いほど傾きが大きい。一方、位相角 30° 以降を取り出した図では、また、フィッティングからのデータのばらつきは高緯度側ほど大きくなっており、中緯度ではエラーバーを超えてばらついている。図 23-26 に位相角に対して各観測日に取得された 5 セットのデータから求めた偏光度の中央値をプロットしたものを示す。図 23-26 におけるエラーバーの幅は 5 セットのデータの標準偏差を表している。

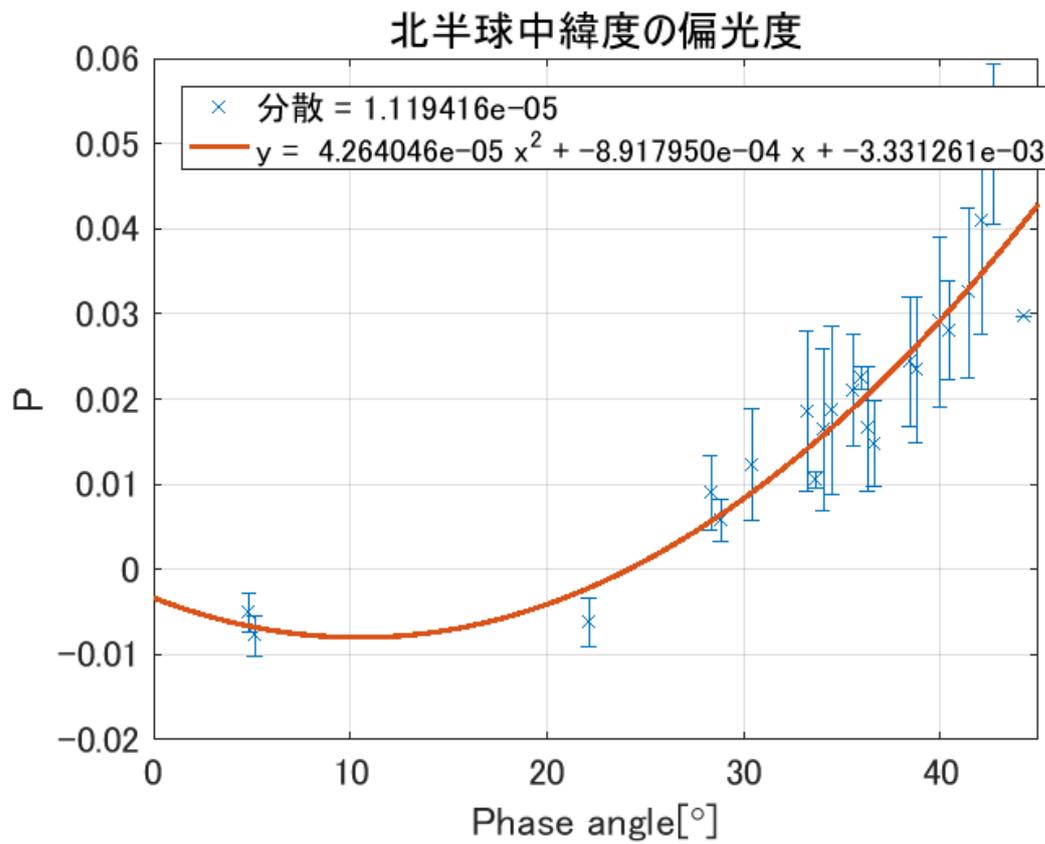


図 23: 北緯 50°-北緯 30° における位相角に対する偏光度

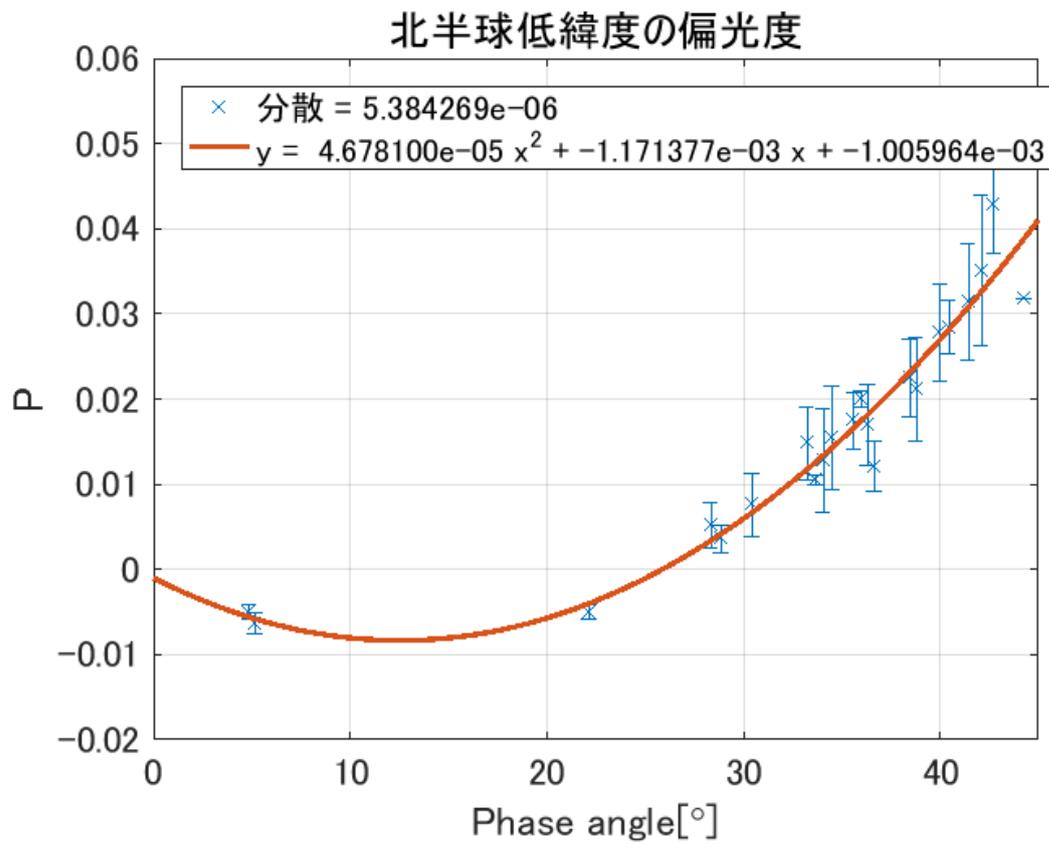


図 24: 北緯 30°-北緯 10° における位相角に対する偏光度

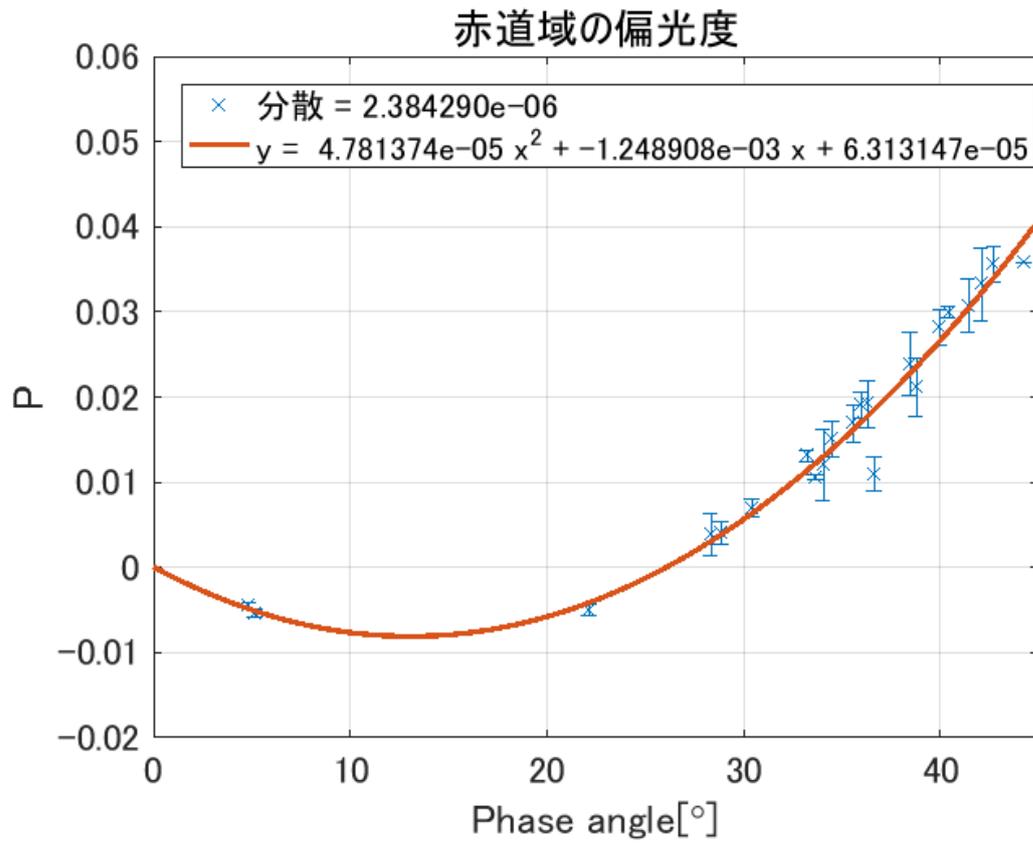


図 25: 北緯 10°-南緯 10° における位相角に対する偏光度

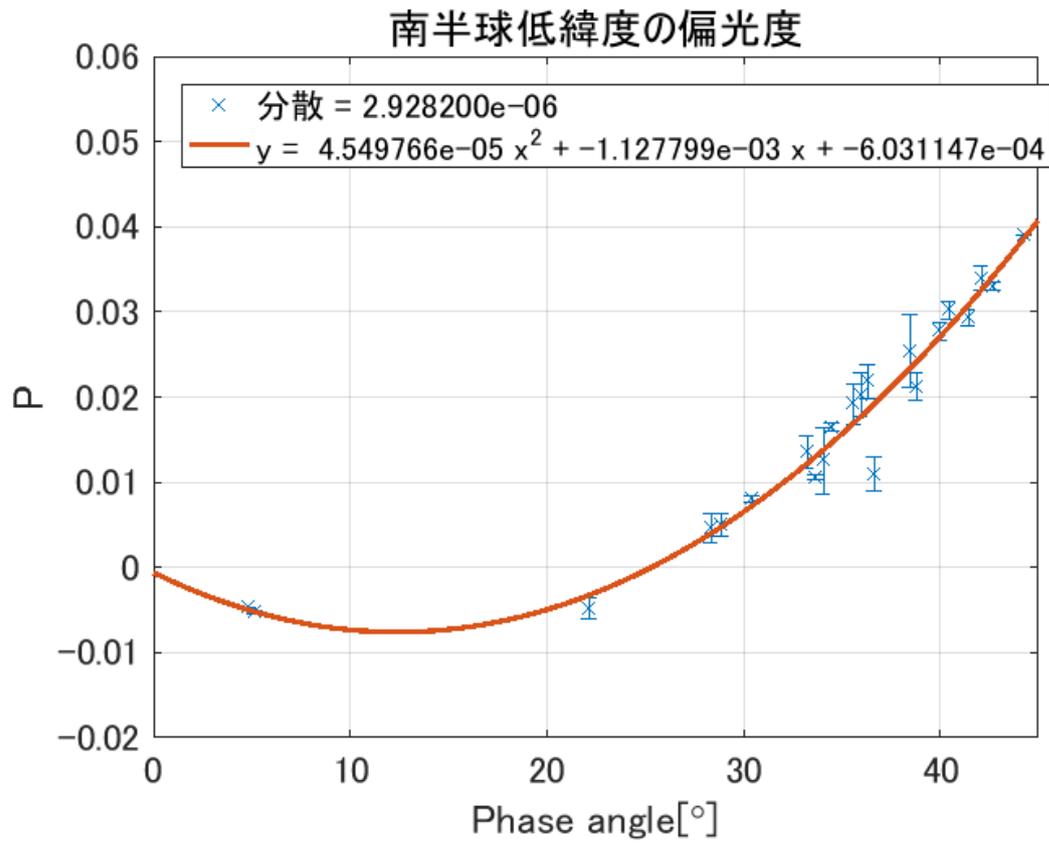


図 26: 南緯 30°-南緯 10° における位相角に対する偏光度

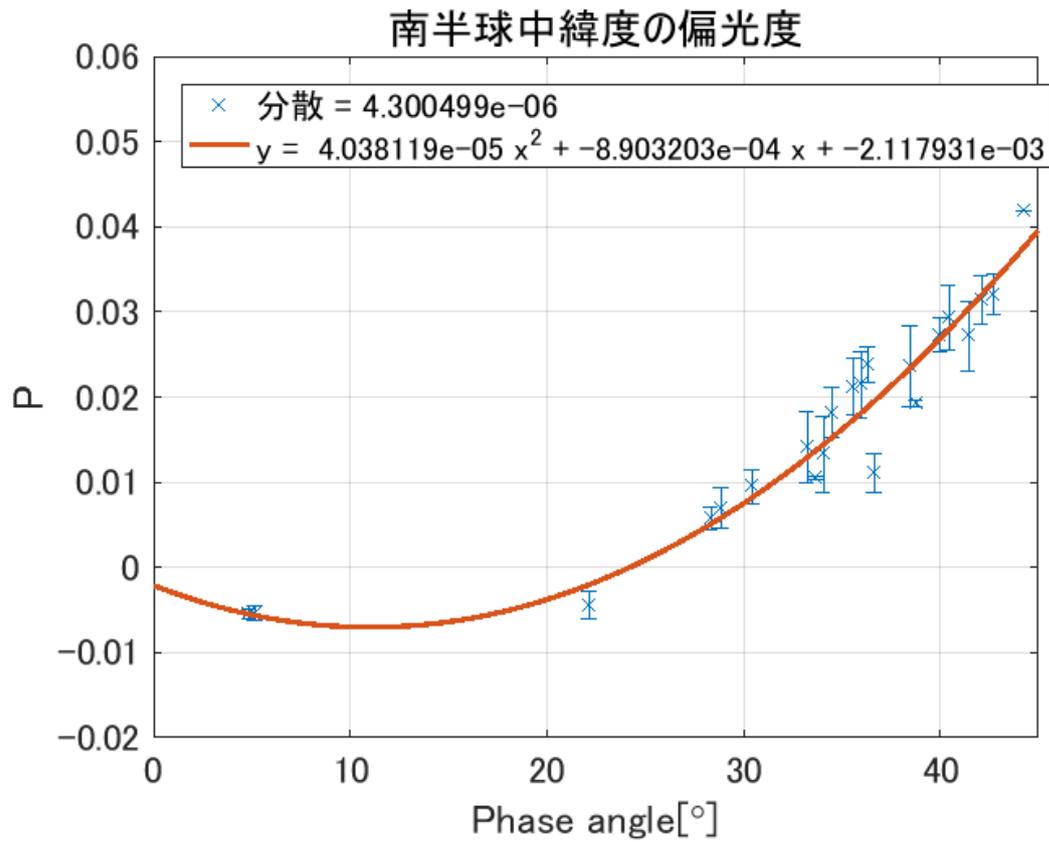
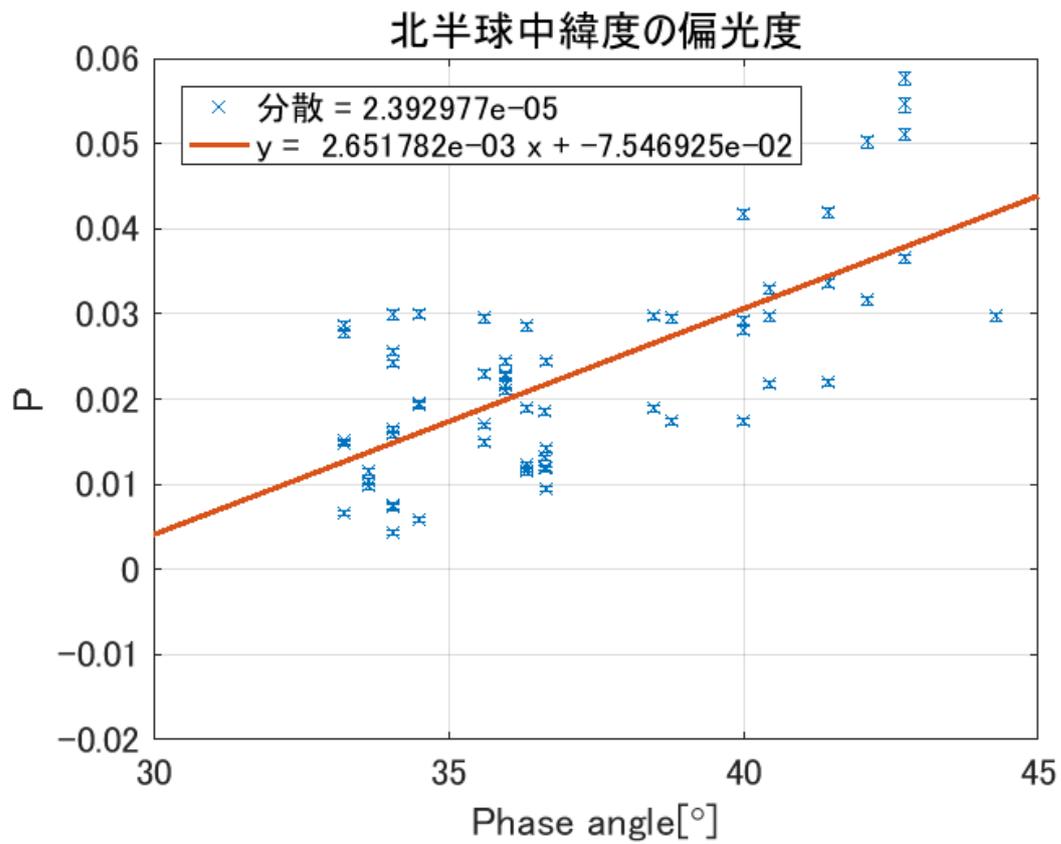


図 27: 南緯 50°-南緯 30° における位相角に対する偏光度

図 18-22 から位相角 30°-50° で取り出したものを図 28-32 に示す. フィッティングは 1 次の近似を用いている.



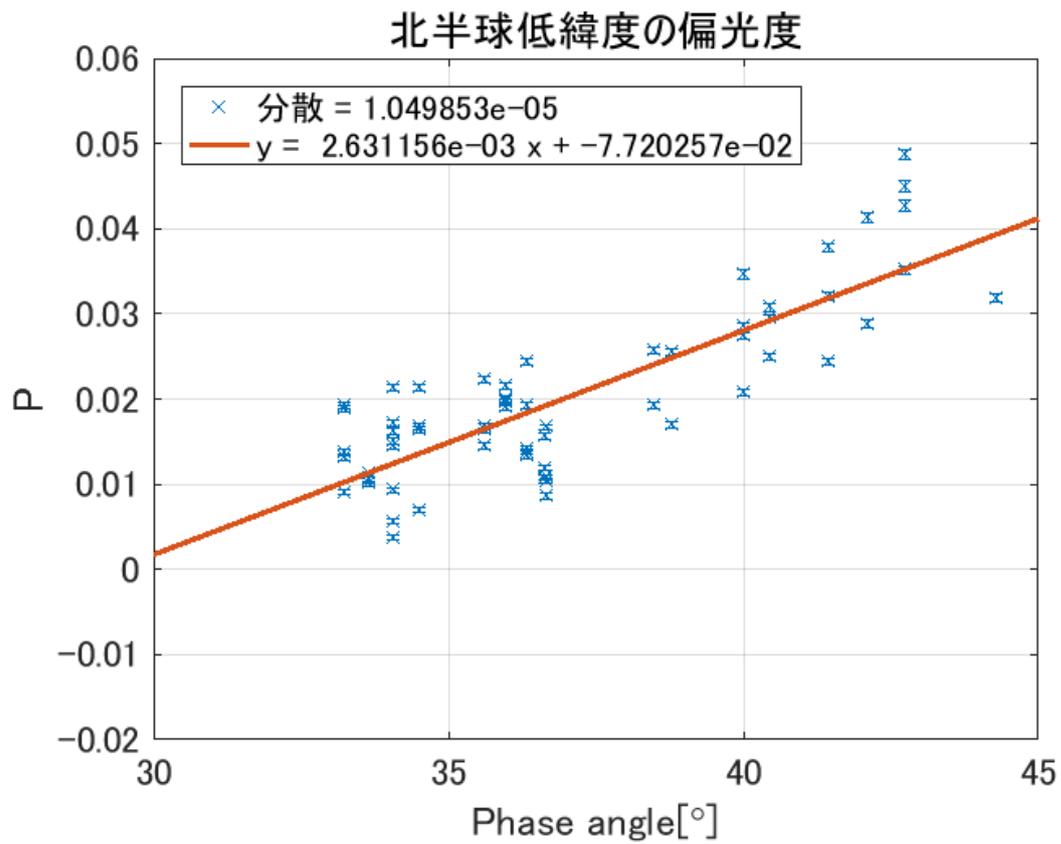


図 29: 北緯 30°-北緯 10° における位相角に対する偏光度

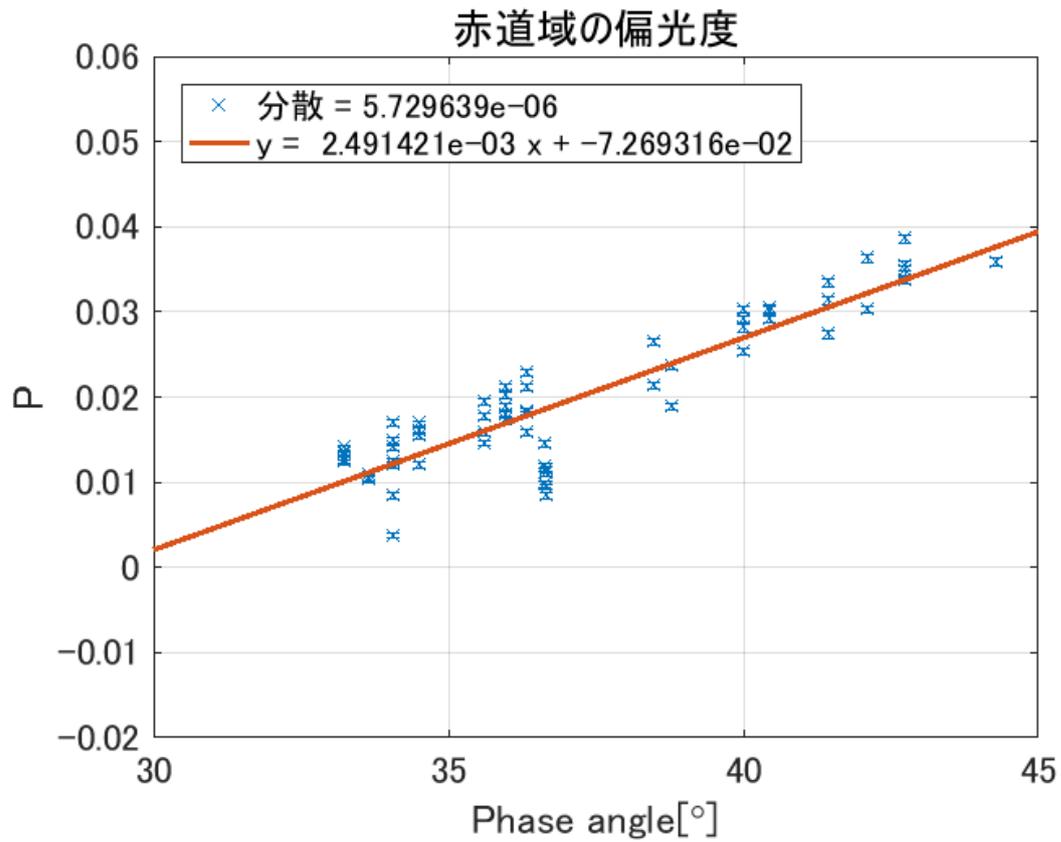
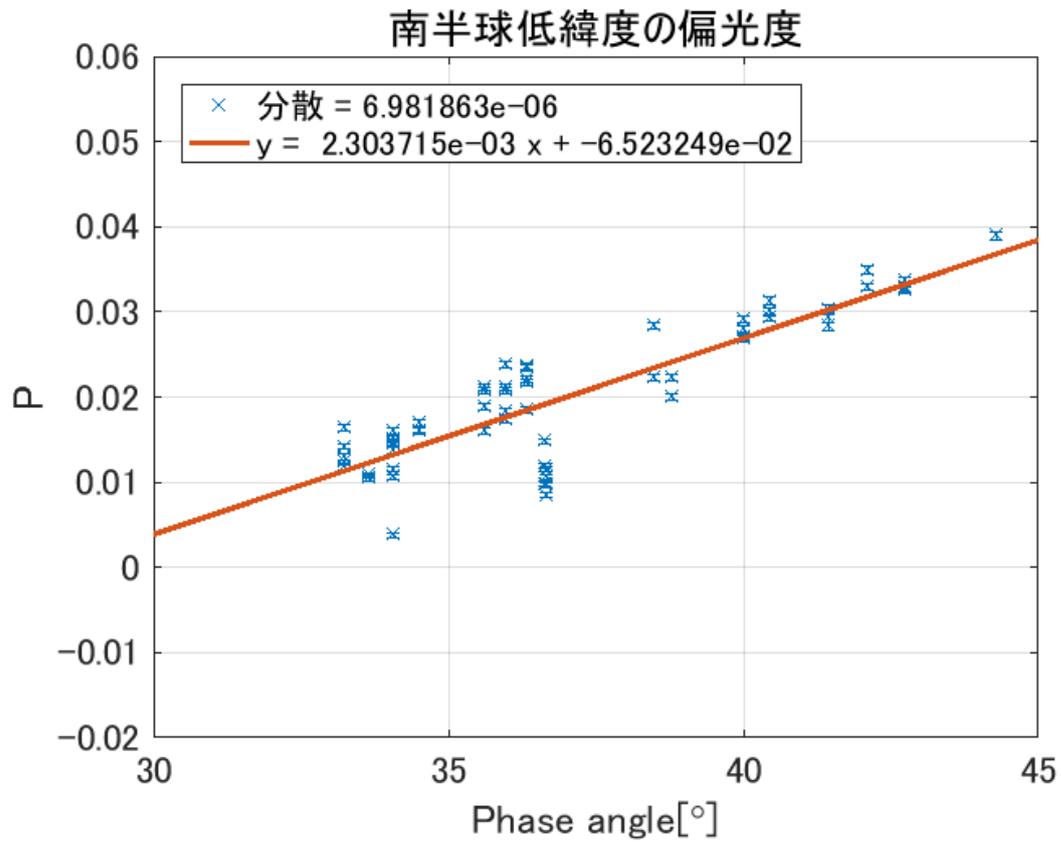
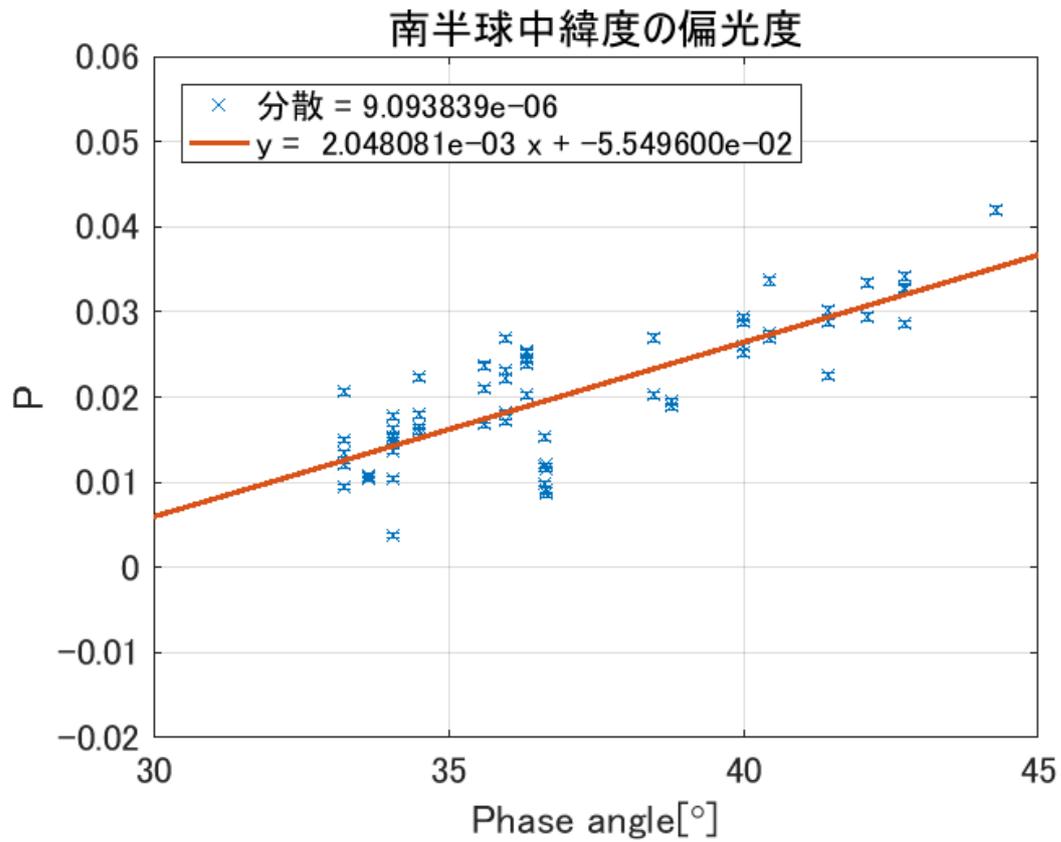


図 30: 北緯 10°-南緯 10° における位相角に対する偏光度





5 Discusstion

図(18)-(22)のプロットは, P の符号が逆転する位相角, 位相角 30° 以降の傾きが, 先行研究における偏光度の変化を表すカーブとよく一致している. 観測波長の違いから, 偏光度の絶対値は異なるが, 短波長であるほど偏光度の値が大きくなるため全体を通したプロットは期待通りの形である.

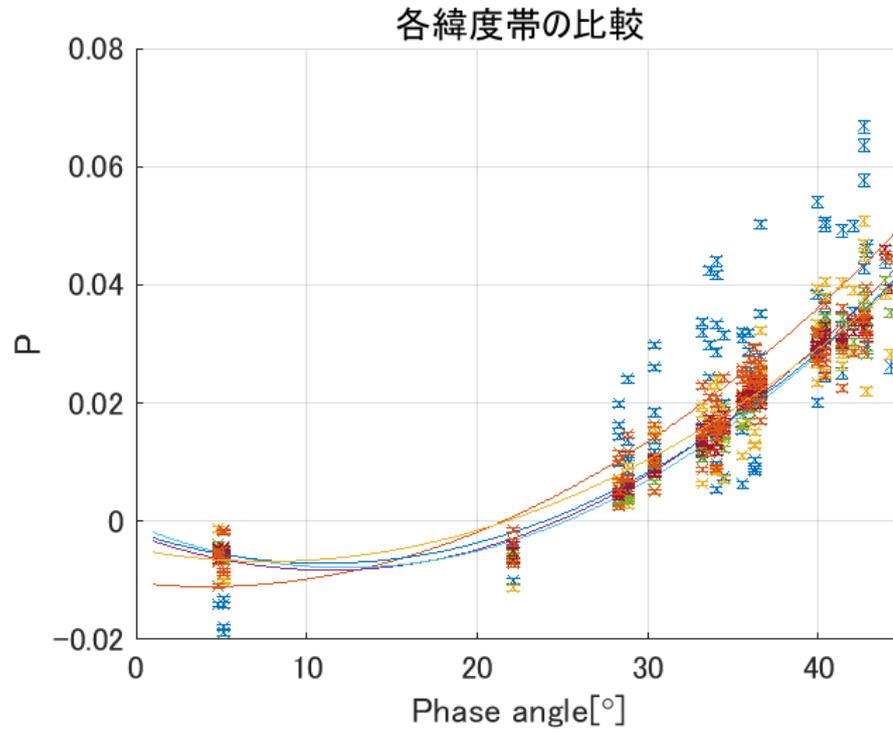


図 33: 各緯度帯の偏光度の比較

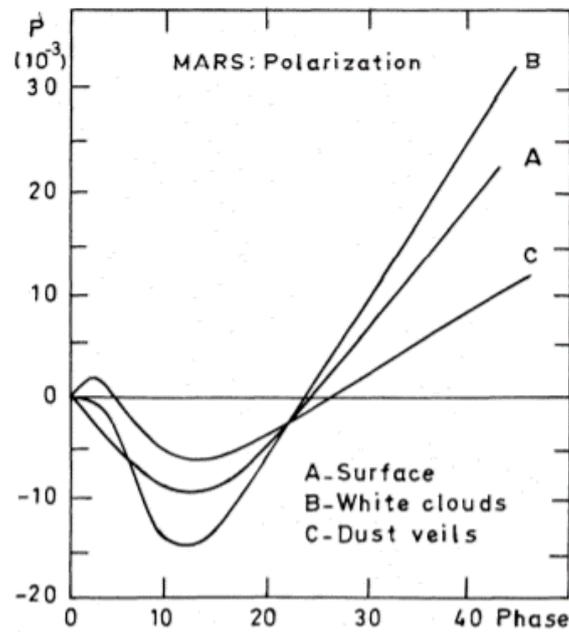


図 34: 火星地表, 雲, ダストの偏光度カーブ (Lee, et al (1990)[5])

フィッティングの2次の係数から南半球の夏から初秋にかけての偏光度の変化の差を比較すると, 赤道域に近い領域で2次の係数の値が大きく, 変化が急であり, 地表面による散乱の貢献が低緯度域で大きいと考えられる. 位相角 $33 - 38^\circ$ における1次のフィッティングでは来たから南にかけて非対称に傾きが小さくなっていることから季節的变化が表れていると考えられる. 仮に地域的なダストストームが発生している場合, 偏光度の変化の傾きは小さくなると期待される. 今後, 北半球の夏から秋にかけての偏光度変化を観測して比較することで季節性を確かめたい.

Mars Express によって観測された雲が含まれているのは, 図 (20) における位相角 $33 - 38^\circ$ の期間である. 雲がある領域と地表のみが見えている領域比較には, 赤道域と南半球低緯度のグラフが適当である. 経度でなく, 緯度で比較を行ったのは, 火星表面の朝, 夕に発生するヘイズに影響を受けないようにするためである. 両者のカーブの2次の項の係数を比較すると, 雲の存在する赤道域で傾きがやや大きくなっているが, これが雲の存在による影響と考えるのは図 25-26 のエラーの大きさを考えると厳しいといえる. また, 緯度依存性を確認するためにはよりディスクをより細分化した解析が必要になる. 緯度帯とは別に, 経度を制限したマスクで偏光度をプロットしたところ, 分散が大きくなり, 変化を検出することがより困難になったためここでは載せていない.

6 Summary & Future works

火星大気は突発的かつ大規模な現象が発生することがあり、ローバー等の探査にも影響を与えるためそのメカニズムの解明は重要な課題である。本研究では2018年7月から火星の偏光観測を行い突発的な大気現象の検出を試みたが、解析では目標とした雲によると考えられる変化を検出することは困難であった。

これからの展望としては、解析手法、特に位置合わせ手法の改善が課題である。位置合わせ後でもシーイング由来と考えられる数ピクセル程度の揺らぎが確認されており、解析で用いた手法の限界が見られた。今回の解析では動画形式で取得した画像フレームを、位置合わせ後に重ね合わせたか、シーイングの影響が少ないフレームの厳選等を行っていない。フレームの厳選の手法には画像の分散を参照して「なまされていない」フレームをとりだす手法があるが、コントラストの低いBバンドでは満足な結果が得られないため、リムの形状を参照する等、他の手法を考える必要がある。また、当初目指していた複数波長帯での観測は光量絞りに用いたバッフルマスクによる装置偏光の増大と信頼性に問題があったため、これを改善して観測波長域を増やし、反射率の違いとモデリングから地表面と大気の大気偏光度の変化を分離することを考えている。本研究の観測開始時は既にダストストームが終息しつつあったため、さらなる観測によってダストストームの一部始終を捉えることで全球的な粒子の活動を追跡していきたい。

7 Acknowledgements

この論文を作成するに当たり,多くの方々にお世話になりました.

指導教官の佐藤 光輝 講師には研究を進めていくにあたって,研究のアイデアや,着目点,解析など,丁寧なご指導をいただきました.

高橋 幸弘 教授には研究に対する姿勢,考え方など多くのことを教えていただきました.

そして,なよろ市立天文台の職員の皆様および,惑星宇宙グループの先輩,同期,スタッフの皆様には研究室生活の中で大変お世話になりました.この場を借りてお礼申し上げます.

8 References

参考文献

- [1] Ebisawa. S., Dollfus. A.(1993), Dust in Martian atmosphere: polarimetric sensing, *Astron. Astrophys.*, 272, 671-686
- [2] Shkuratov. Yu., Kreslavsky. M., Kaydash. V., Videen. G., Bell III. J., Wolff. M., Hubbard. M., Noll. K., Lubenow. A.(2005), Hubble Space Telescope imaging polarimetry of Mars during the 2003 opposition, *Icarus* 176, 1-11.
- [3] McLean, W., Stam, D. M., Bagnulo, S., Borisov, G., Devogle, M., Cellino, A., Rivet, J. P., Bendjova, P.(2017), Vernet, D., Paolini, G., Pollacco. D., A polarimetric investigation of Jupiter: Disk-resolved imaging polarimetry and spectropolarimetry, *Astron. Astrophys.*, 601, A142
- [4] Snchez-Lavega. A., Chen-Chena. H., Ordoez-Etxeberria. I ., Hueso. R., del Ro-Gaztelurrutia. T., Garro. A., Cardesn-Moinelo. A., Titov. D., Wood. S. (2018), Limb clouds and dust on Mars from images obtained by the Visual Monitoring Camera (VMC) onboard Mars Express, *Icarus*, 299, 194-205
- [5] Lee. P., Ebisawa. S., Dollfus. A.(1990), Crystal clouds in the Martian atmosphere, *Astron. Astrophys.* 240, 520-532
- [6] 今井正亮 (2013) ピリカ望遠鏡による金星紫外吸収模様の緯度プロフィールと循環周期観測
- [7] FN の高校物理 「偏光とは何か」
http://fnorio.com/0124polarization_of_light0/polarization_of_light0.html
2019/01/31 07:28 閲覧
- [8] ESA(2018/10/25), 「Mars EXpress keeps an eye on curious cloud」
http://m.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Mars_Express/Mars_Express_keeps_an_eye_on_curious_cloud 2019/01/31 07:28 閲覧
- [9] 国立天文台編, 理科年表 平成 24 年 丸善出版

- [10] 松田佳久,2000,「惑星気象学」,東京大学出版会