

ピリカ望遠鏡による金星紫外吸収模様 の緯度プロファイルと循環周期観測

今井 正亮

Imai Masataka

学生番号：22090112

北海道大学 理学部 地球惑星科学科

惑星宇宙グループ

Department of Earth Science, Undergraduate school of Science,

Hokkaido University

Planetary and Space Group

指導教官：高橋 幸弘

平成 25 年 4 月 10 日

Abstract

地球の双子星と呼ばれることがある金星は、サイズや密度などの点で地球とよく似ている。しかし両者の大気については、温度・圧力・組成そしてダイナミクスに大きな違いが存在し比較惑星学的に大変興味深い。金星にはスーパーローテーションと呼ばれる大気全体が自転の約 60 倍で回転する現象が存在し、現在までに様々なモデルが提唱されているがそのメカニズムを解明するには至っていない。また大気中には、高度 45–70 km に存在する雲の主成分 H_2SO_4 由来と考えられている紫外波長 365 nm を強く吸収する物質が存在し、光学観測によってその分布を反映した明暗模様を見ることができる。模様の大きいものは惑星スケール (~1000 km) にも達し、その集合が金星ディスク上に巨大な Y 字形に見える模様を映しだしている。[Esposito et al., 1997 他] Del Genio & Rossow (1982, 1990) は、この模様がスーパーローテーションに対応した大気中の波動伝搬を反映して移動しており、金星の明るさが模様の回転 (伝搬) に対応して周期変動すると発表した。彼らは金星探査機 Pioneer Venus 搭載装置 OCPPP を用いた測光観測から、紫外模様の伝搬速度と風速には対応関係があり、明るさの変動周期が時期や緯度によって約 4–6 日の間で変化することを発見している。

本研究は、北海道大学の所有する 1.6m ピリカ望遠鏡を用いて約 1, 2ヶ月毎に金星の紫外波長観測を行い大気の時空間発展を捉えることで、観測的事実の蓄積とそれに根ざしたスーパーローテーションの理解を進めることを目的としている。昨今の金星観測の大半が衛星によるのものであるが、地上望遠鏡を用いた観測によって 1 日最大 8 時間に及ぶ連続観測と金星の両半球を捉えることができ、衛星データ利用とは異なるという新規性がある。また金星紫外の明るさ変化と緯度帯ごとの周期について継続した連続観測と時期ごとの比較を行った研究は少ないが、惑星大気ダイナミクスを研究する上ではその惑星大気系の大規模構造の理解と”季節性”に着目した観測が不可欠である。

本論文では、今までの観測データの中から 7 月の観測期間に 5 日間連日で撮像された波長 365 nm の画像を解析した結果を報告しその議論を行う。今回の解析では、期間中に撮像されたすべての金星イメージについて赤道帯の明るさを基準に各緯度帯の明るさを比率の形で表現する手法を用い、その時間変化を調査した。これによって本来必要とされる地球大気の影響に関する補正に対処し、~5,000 km スケールの模様によると思われる優位な明るさの変化をそれぞれの緯度帯で捉えることに成功している。得られた断続的な明るさの時間変化は明暗模様の経度方向の分布を再現していると考えられ、緯度間や南北半球の比較から 50°S – 50°N の間で模様の分布が同期している可能性が示唆された。現在我々は、ピリカ望遠鏡による観測データの他に現行の金星観測衛星 Venus Express に搭載された VMC の紫外画像の解析にも着手しており、両者データの相互利用により金星明るさの絶対的な変化の見積もりを行い、観測期間ごとの比較を目標とした今後の研究方針についても記述する。

目次

1	Introduction	2
1.1	背景	2
1.2	金星大気紫外模様	3
1.3	スーパーローテーション	5
1.4	紫外測光と大気循環周期観測	6
1.5	研究目的	10
2	Observation	11
2.1	観測装置	11
2.2	観測手順	14
2.3	観測ログ	15
3	Data Reduction & Analysis	16
3.1	画像処理	16
3.2	画像解析1：緯度プロファイル	23
3.3	画像解析2：球面散乱補正	24
4	Results	26
5	Discussion	34
6	Summary & Future Work	36
7	Appendix	38
8	Acknowledgments	45
9	References	46

1 Introduction

1.1 背景

太陽系内の惑星で地球の最も近くを公転する金星は、赤道半径や質量が地球とよく似ており地球の双子星と呼ばれることがある。しかし、Table 1.1 の示す通り両惑星の纏う大気は全く異なっている。地球と比べ高温高圧の金星大気は、その成分の約 96 % を CO_2 が占めており、高度 45–70 km に分厚く存在する雲の主成分は硫酸 H_2SO_4 である。

また金星の天体としての運動の様子も地球とは異なっている。金星の自転周期は地球に比べ非常に長く、赤道傾斜角は地球に比べると小さい。1.3 で詳しく述べる金星大気の高速循環 ”スーパーローテーション” の不思議は金星の自転速度の遅さからくるものである。金星の赤道傾斜角は金星が逆行していることを考慮に入れると、約 3° しか傾いておらず金星には ”季節性” はあまりないと考えられている。

以下の節では背景知識となる金星特有の現象とそれに関連した先行研究を紹介し、本研究における目的の導入を行う。

	金星	地球
赤道半径 [km]	6052	6378
質量 [$10^{24}kg$]	4.87	5.97
密度 [g/m^3]	5.24	5.52
重力加速度 [m/s^2]	8.9	9.8
太陽からの距離 [AU]	0.723	1.00
離心率	0.00677	0.01671
軌道傾斜角	3.39°	0°
赤道傾斜角	177.4°	23.44°
自転周期 (地球日)	243.0	1.00
公転周期 (地球日)	224.7	365.2
平均値表気圧 [hPa]	92000	1013
平均地表面温度 [K]	730	288

Table 1.1: 金星と地球のパラメータ比較 (松田, 2011 他より抜粋・作成)

1.2 金星大気紫外模様

Pioneer Venus に搭載された OCPP (Orbiter Cloud Photopolarimeter) の紫外金星イメージには可視光では見ることのできない模様が写っている。金星大気中の紫外吸収物質の分布によって作り出されるこの明暗模様は、筋状構造をした模様が集合し金星ディスク全体に横倒しになった Y 字形の模様を作っている。金星大気における代表的な紫外吸収は 283 nm と 365 nm で、前者は SO_2 によって起こる。 SO_2 は雲の主成分である硫酸が化学反応で作られる際の元となる物質だが、地上からの観測では地球大気の影響から 283nm 帯の観測をすることは不可能である。

一方、後者の吸収物質は未だ同定されていない。硫酸の化学反応に由来した硫黄 S に関係する物質で、雲頂に存在するエアロゾルだとする推測がある。365 nm は経験的に紫外領域の中で最も強く明暗のコントラストが現れることが知られており、過去の金星探査衛星に搭載された撮像装置には 365 nm に中心波長をもつフィルターが使われてきた。取得された画像は主に模様時間の変化から大気ダイナミクスを調べる研究に用いられている。[Pollack et al., 1980; Toon et al., 1982; Esposito, 1980]

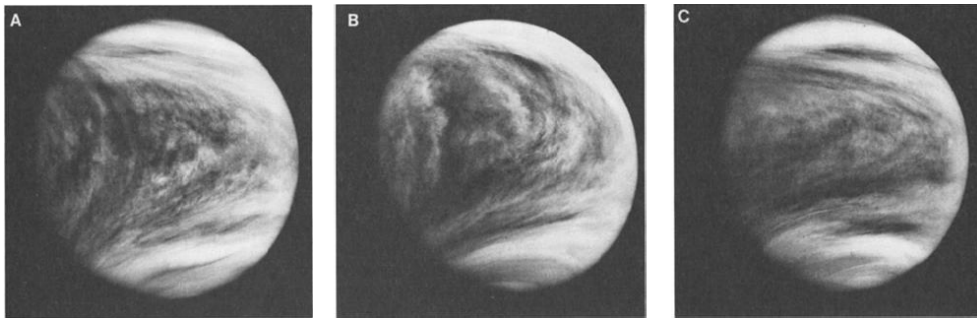


Figure 1.1: OCPP 撮像イメージ A : March 3,1979, B : March 7,1979, C : March 9,1979 撮像 (Rossow et al, 1980)

上図は実際に OCPP によって 1979 年 4 月に撮像された三枚の金星イメージである。A と B はほぼ同じ大気を、C は A,B では見えていない裏側の大気を写していると考えられる。これらの画像から Y 字形の模様は惑星を一周するサイズで存在している様子が分かる。

1.3 のスーパーローテーションについて頭に入れた状態で改めて Figure 1.1 を見ると A から B にかけて 4 日の時間経過があり模様はほぼ 1 周、C は B から 2 日が経過し半周していると考えられ、実際のイメージとして金星を一周する模様を見ることができる。このことから確かに金星の Y 字模様は 4 日循環していることが伺える。

下図は OCPPP による一連の観測から捉えられた金星大気中に存在する紫外模様を描写したものである。Y 字形は南北 50° まで及ぶ構造であり、同時に多数の大小様々なスケールの模様が存在する様子が描かれている。

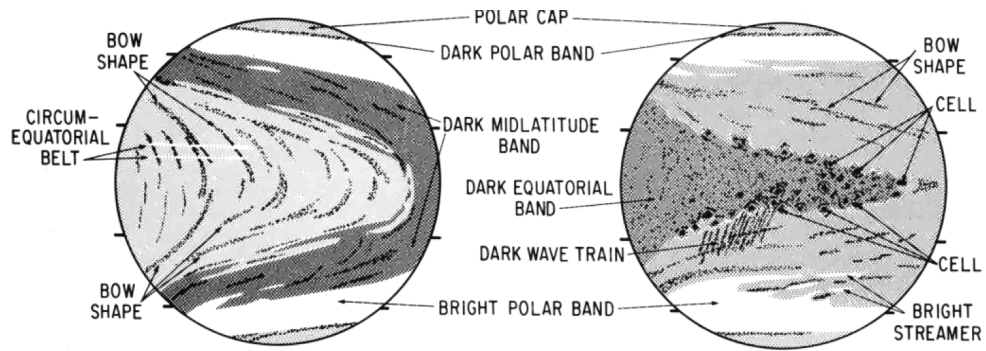
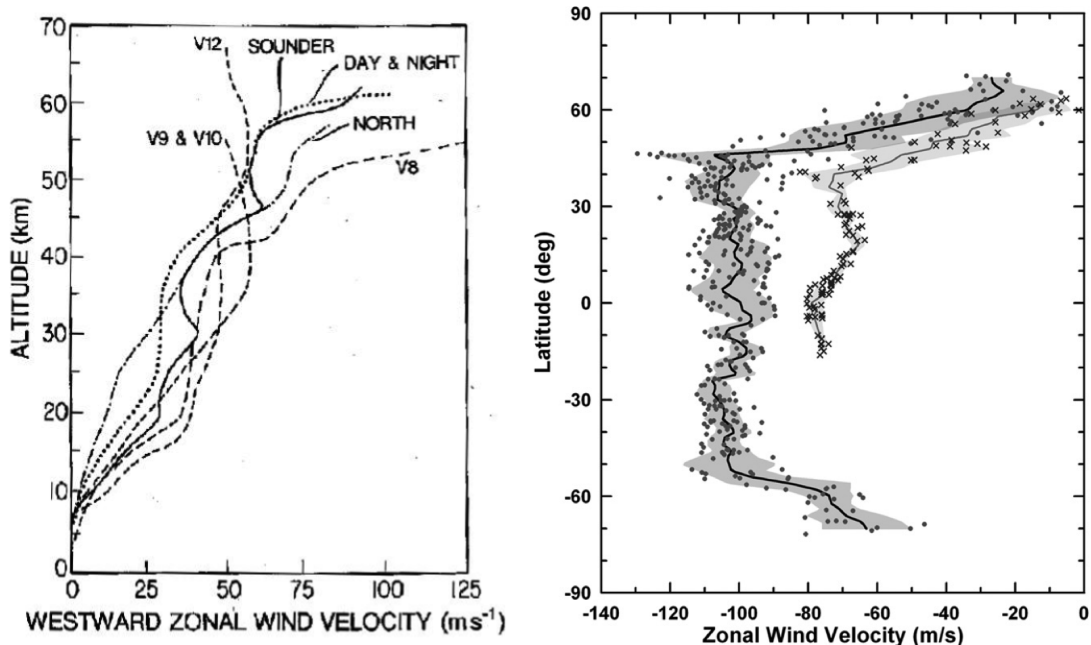


Figure 1.2: 金星紫外模様の模式図：円の左右外側の線は 20° と 50° の緯度を示す (Rossow et al, 1980)

1.3 スーパーローテーション

アマチュア天文家によって初めて発見された Y 字形の紫外線吸収模様は、1960 年代にフランスの天文学者による地上観測から模様のパターンが約 4 日で東から西に惑星を一周していることが発見された。金星の赤道半径は約 6,050 km なので、単純計算からこの模様は赤道付近で 100 m/s 程の速さをもっていることが分かる。一方で金星の自転周期は地球日にして 243 日であり、速度にすると赤道で約 1.6 m/s である。つまり金星の紫外模様は自転の約 60 倍の速度で回転していることになる。ちなみに金星の自転は逆行しており、模様の移動も自転と同じ方向である。

この模様的高速回転は金星の大気の中で最も不思議な現象としてその特徴から、"スーパーローテーション"もしくは"4日循環"と呼ばれている。スーパーローテーションの発見以来、金星にはより詳細な観測のために何機もの衛星が送られている。Figure 1.3 (a) は過去に金星に投下されたプローブによって複数の地点で直接計測された大気中の風速と高度の対応を記したものである。その結果から確かに金星には自転速度の 60 倍で吹く高速の風が存在していることが明らかになった。また、風速の緯度プロファイルについても観測による結果が多数報告されている。Figure 1.3 (b) は Galileo 衛星による 418 nm と 986 nm それぞれのクラウドトラッキングから得られた風速で 418 nm(●) は 65–70 km 付近の雲層高度、986 nm(x) はそれよりも低い高度に対応している。一般に金星に吹く経度方向の高速風の速さは低～中緯度にかけて一定だと言われ、南北での目立った違いは確認されておらず、高速風の崩れる緯度も南北で対照的とされている。



(a) プローブ投下によって計測された金星西向き風速 (b) Galileo 衛星画像解析から得られた風速の緯度分布の高度分布 (Schubert, 1983) (Peralta, 2007)

Figure 1.3: 金星大気中の風速

1.4 紫外測光と大気循環周期観測

スーパーローテーション発見の元となった Y 字模様について、その移動が風によるものなのか金星大気中の波動現象によるものなのかがハッキリしたのは衛星による観測がなされてからである。

Del Genio & Rossow (1982, 1990) の研究には、Pioneer Venus の OCPP による紫外波長の測光観測から大気中を移動する模様を通過に合わせて明るさが周期変化する様子が捉えている。Figure 1.4 は赤道と南緯 45° の 2 つの緯度帯で、経度幅 90° 分の平均された明るさが示す時間変化を示したものである。これによって波数が 4 より小さい波動による明るさの変化が示されている。注目すべき点は両緯度帯とも約 4 日の周期変化をしていることであり、金星のスーパーローテーションとの対応がすぐに思い起こされる。また、時期によって赤道と南緯 45° の間で位相のズレを読み取ることもできる。

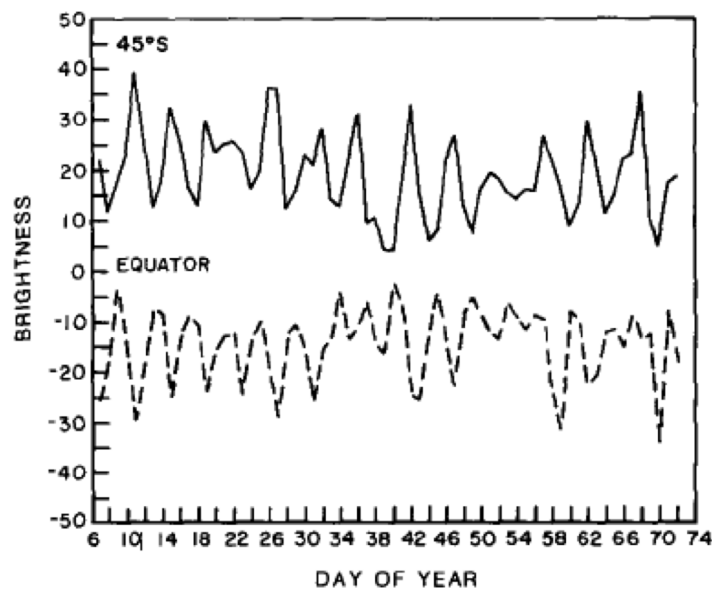


Figure 1.4: Pioneer Venus OCPP 画像解析による紫外明るさの時間変化 (Del Genio & Rossow, 1982)

複数緯度帯で上図のような変化の周期を詳細に理解するため、彼らの論文中にはそれぞれのデータを周波数解析した結果が示されている。(Figure 1.5, 1.6) OCPP の観測によって 1979 春から 1986 夏まで 8 つのデータセットが用意され、約半年～1 年の時間間隔で周期が移り変わる様子が捉えられた。赤道と南北中緯度で周期が等しい時期と異なる時期が存在し、またピーク周期の優位性が弱まる時期があるようにも解釈できる。南北の対称性は強く保存されている。

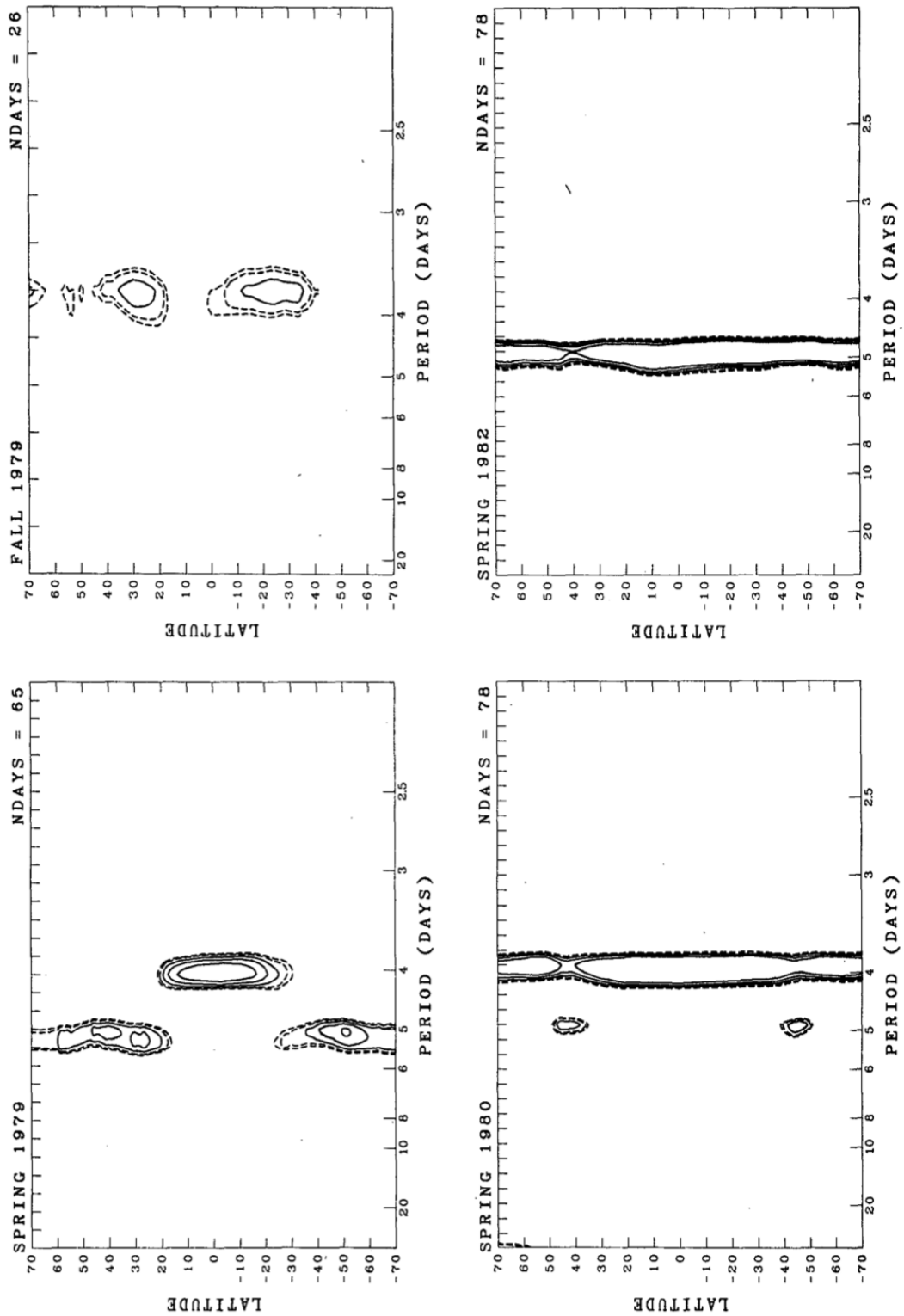


Figure 1.5: 紫外明るさ変化の周波数解析によって得られた周期の緯度プロファイル1 (Del Genio & Rossow, 1990)

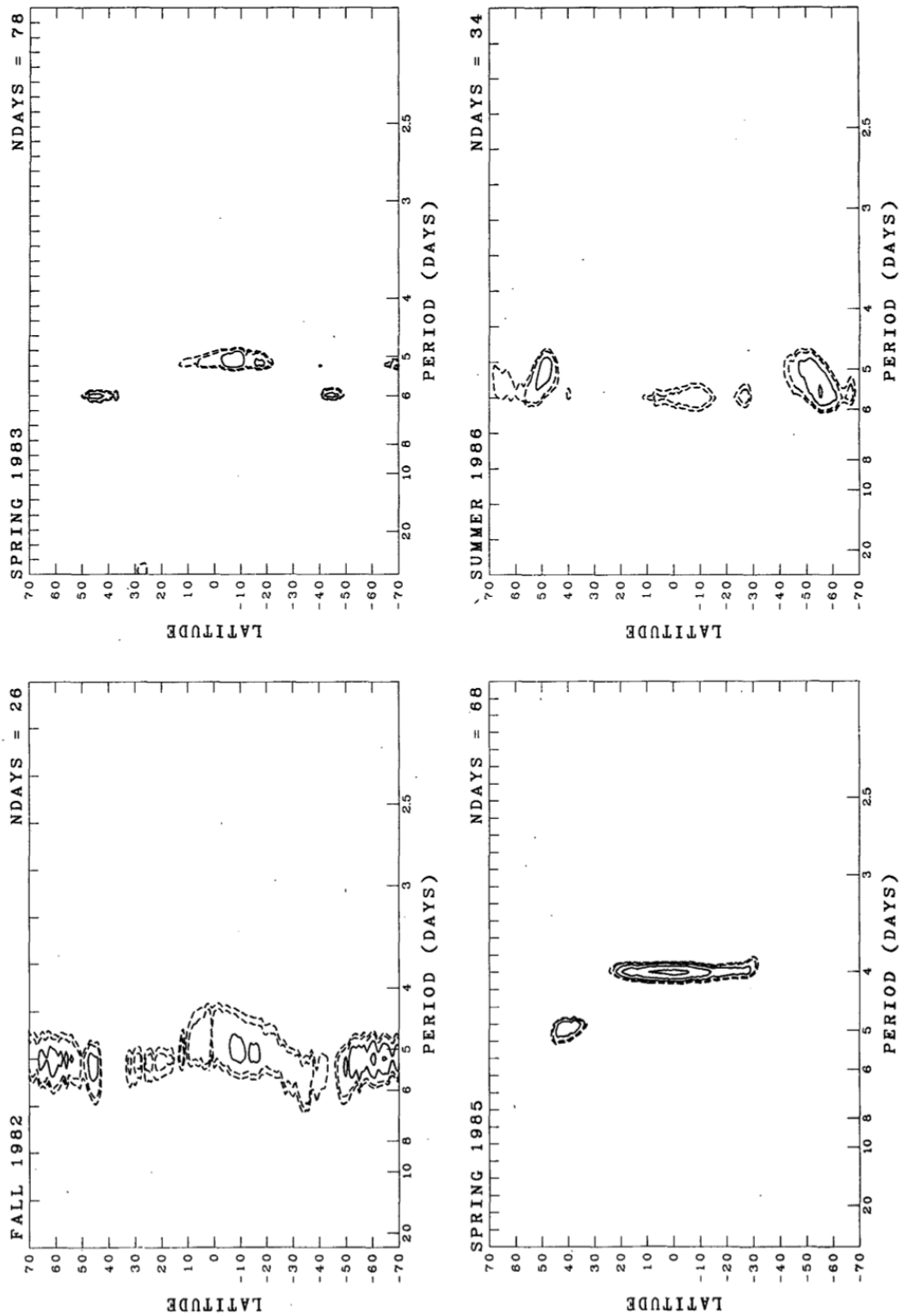


Figure 1.6: 紫外明るさ変化の周波数解析によって得られた周期の緯度プロファイル 2 (Del Genio & Rossow, 1990)

下図は前述の周波数解析の結果から逆算された波動 (模様) 伝搬速度 (○ : Brightness) と, OCPP の画像から別で計算された風速 (● : Mean Zonal Wind) の時間変化の対応を赤道部について示した図である. 風速は画像中の 200–600 km スケールの模様をトラッキングすることで見積もられている. [Rossow et al, 1989]

この結果から実際には模様の伝搬が波動現象であるということが理解される. 一方で波動伝搬速度と風速のピーク・ボトムの時期は明らかな対応関係を示し, 約 5–10 年の時間スケールで変動している可能性が示唆されている.

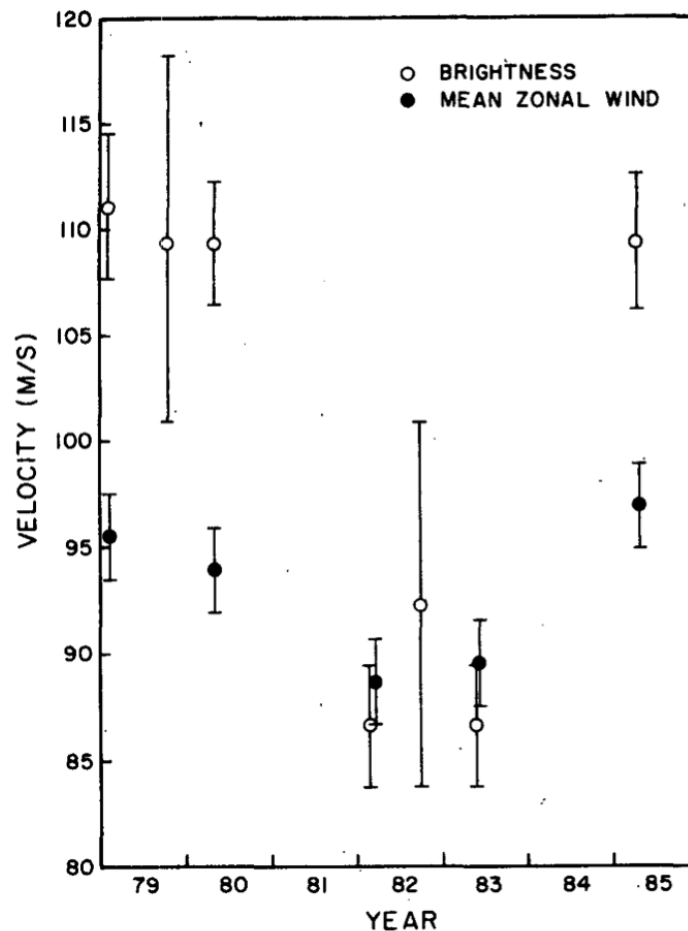


Figure 1.7: 紫外明るさ周期と風速の変動の対応 (Del Genio & Rossow, 1990)

1.5 研究目的

これまで述べてきた金星固有の現象について最も興味深い点は、スーパーローテーションを含む金星の大気ダイナミクスが地球上に存在する波動現象から説明のつくものであるかというところにある。Del Genio & Rossow (1990) では OCPP から得られた波動現象の考察をケルビン波, ロスビー波, ハウルウィッツ波と熱潮汐の4つから行なっているが, 明らかになった長期変動の原因について詳しい理解はされていない。惑星規模の大気ダイナミクスには一般に太陽との関係(季節性)が期待される。しかし Figure 1.7 によって示された5–10年の変動について, 金星の自転や公転の諸パラメータ(自転周期 243.0日, 公転周期 224.7日, 金星の1太陽日 116.8日)との具体的な対応関係を導くにはより短い時間間隔の観測が要求される。

先行研究でも理解されるとおり, 紫外の模様の変化はスーパーローテーションを反映しており, 視覚的にも理解しやすい。本研究では地上望遠鏡によるより短いスパンでの定期観測から金星大気中の波動現象のモニタリングを行っている。これによって周期の移り変わる時期の過渡状態の理解と, 周期変動と金星の物理的性質(自転・公転周期, 地形特性など)との対応付けを目標とする。また, スーパーローテーション領域における南北対称性が常に保存されるものであるかの検証も行う。

この論文では2012年7月に観測を行った期間のデータを用いて紫外の明るさの時間変化を緯度帯ごとに追ひ, 特徴的な変化を示す点について議論する。また, スーパーローテーションによると思われる周期変化の特徴を今回の観測データから明らかにする。

2 Observation

2.1 観測装置

○ピリカ望遠鏡

ピリカ望遠鏡は北海道大学・大学院理学研究院・附属天文台の所有する口径 1.6 m の光学望遠鏡である。この望遠鏡は惑星観測専用として北海道大学理学院宇宙理学専攻・惑星宇宙グループによって管理・運営されており、国内で三番目の口径をもっている。そのため本研究で必要な定期的なマシンタイムの占有と大口径を生かした昼間の金星観測を実施することが可能となった。実際に観測を行った期間については 2.3 に記述する。札幌市から約 220 km ほど北東にある名寄市内に建設されたこの望遠鏡は、東経 $142^{\circ}28'59''$ 、北緯 $44^{\circ}22'27''$ 、標高 161 m に位置しており、この地域の標準シーイングサイズは 1.3–2.3 arcsec である。以下にピリカ望遠鏡の光学系に関する仕様表を掲載する。

全体光学系	
形式	リッチークレチアン
焦点	カセグレン
有効口径	Φ 1600 mm
合成焦点距離	19238 mm (F/12.0)
有効視野	カセグレン Φ 20 分角

Table 2.1: ピリカ望遠鏡仕様表



Figure 2.1: ペリカ望遠鏡外観

○MSI(Multi -Spectral Imager)

MSI (Multi -Spectral Imager) は狭帯域フィルターを使用した紫外～近紫外波長, 及び液晶可変フィルターによって可視光～近赤外波長を観測要件に合わせて選択し撮像することのできる装置である. 特に液晶可変フィルターは印加電圧を変化させることで透過波長を任意に選択することのできるため, 多波長のスペクトルイメージを取得することが可能である. また検出器として使用されている EM -CCD は高速読み出しが可能であり, 更にサブアレイ読み出しによって読み出し速度を上げられるためより短い露光時間を可能とし, それによる高速連続撮像も行うことができる.

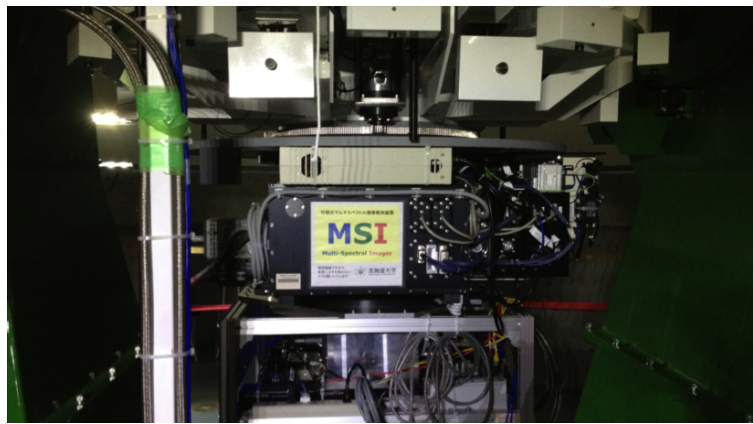


Figure 2.2: MSI 装置外観

波長域:	0.36–1.05 μ m
視野:	3.3 分角 \times 3.3 分角 (0.39 秒角/pixel)
フィルター:	
● 液晶可変フィルター \times 2台	VIS: 400–720nm, $\Delta\lambda \sim 10$ nm (@650nm) SNIR: 650–1100nm, $\Delta\lambda \sim 10$ nm (@900nm)
● 狭帯域フィルター	360, 365, 370, 380, & 390nm, $\Delta\lambda=10$ nm
● 広帯域フィルター	B, V, Rc, Ic
検出素子:	512 \times 512 pixel EM -CCD (浜松ホトニクス)
設置場所:	カセグレン焦点
限界等級:	B \sim 19.8, V \sim 19.8, R \sim 19.6, I \sim 18.6 (60s 積分, S/N=10)

Table 2.2: MSI 装置仕様表

2.2 観測手順

明けの明星, 宵の明星と呼ばれることのある金星はその名の通り肉眼でも見ることできる非常に明るい星である. また内惑星であるという特徴から可視時間は明け方か夕方であり, 一般に天体観測が行われる真夜中に金星を観測することはできない. 太陽-金星-地球のなす位相角によって月のような満ち欠けが起こるといった特徴も存在する. MSIの露光時間を短く設定することで太陽の登っている時間帯にも観測を行い長い観測時間の確保を可能とした. これによって1日に~8時間ほどの観測時間を確保できている. 昼間の観測が主体となるため標準星の取得は行なっていない. (→ Analyze)

Datasetに詳細を記すが, 観測は本研究の目的に合わせ1期間8日間程で計画・実施し, 観測期間の間隔は1,2ヶ月としている. 特記事項として2012/6/6に金星は日面通過(内合)時期を迎えており, また2013/3/29には外合が控えている

観測時の運用は,

バイアス画像($\times 10$)の取得 → 金星画像($\times 3$) → バイアス画像

の手順を360 nmから450 nmで行いこれを約1時間間隔で実施. 太陽南中頃に金星撮像を終了し各波長のフラット画像を取得, となっている. なお, 金星画像はCCD視野内で金星の視直径程度のデザリングを行い3枚ずつ取得されている.

観測時間中のデータ不在はすべて天候不良によるものである.

2.3 観測ログ

本研究で実施された観測についてその期間及びデータ取得日、観測時の金星情報を下表に掲載する。また参考画像として4, 7, 8月の金星画像を掲載する。

期間	観測期間 (UT)	データ取得日	累計	金星視直径	昼面経度幅
期間 1	4/9~4/15	10,12, 13,14,15	4日	約 29 秒角 (75 pixel)	約 80°
期間 2	4/23~4/26	24, 25,26	2日	約 33 秒角 (85 pixel)	約 70°
期間 3	6/21~6/29	24,25,26,27,28, 29	5日	約 50 秒角 (130 pixel)	約 37°
期間 4	7/16~7/23	16,17,18,19,20,21	6日	約 33 秒角 (85 pixel)	約 70°
期間 5	8/14~8/21	14,17,18,21	4日	約 22 秒角 (57 pixel)	約 92°
期間 6	10/23~10/27	23, 24, 25, 26	4日	約 16 秒角 (41 pixel)	約 125°
期間 7	11/28~12/6	-	0日	約 14 秒角 (35 pixel)	約 140°

Table 2.3: 本研究の金星観測情報

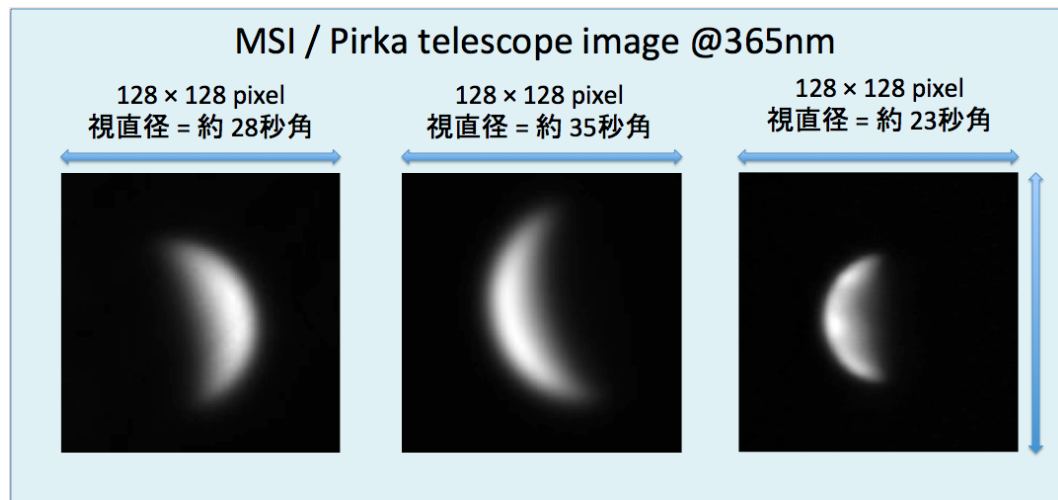


Figure 2.3: MSI 撮像金星画像 左から 2012/4/14, 2012/7/16, 2012/8/18 (JST) 撮像

3 Data Reduction & Analysis

3.1 画像処理

- 基本画像処理

解析で使用する金星の生画像に対して行った処理を記述する。観測時に MSI で取得した画像には金星画像とバイアス画像・フラット画像がある。バイアス画像は MSI の CCD の出力値が負の値を示さないように予め設定されているカウント値を画像として取得したもの。CCD に光をまったく当てていない状態で露光時間を設定可能な最小の時間にして取得する。連続で撮像した 10 枚を平均して一枚のバイアス画像とした。暗電流の効果によるカウントを含む。フラット画像は CCD の 1 ピクセルごとの感度ムラを補正する目的で使用する画像。金星撮像に使用した波長毎にそれぞれ取得した。紫外波長は CCD の感度が低いため一般的に使用されるトワイライトではなく昼間のスカイを撮像した。MSI 視野内の空を一様な光源とみなし各波長ごとに 5 枚を平均し、そのカウント値を 1 で規格化してフラット画像とした。以上の 2 種類の画像を用いて金星の生画像に対して

$$\frac{(\text{金星生画像} - \text{バイアス画像})}{(\text{フラット画像} - \text{バイアス画像})} = \text{金星処理画像}$$

という処理を行い処理された金星画像を得ている。またスカイのバックグラウン

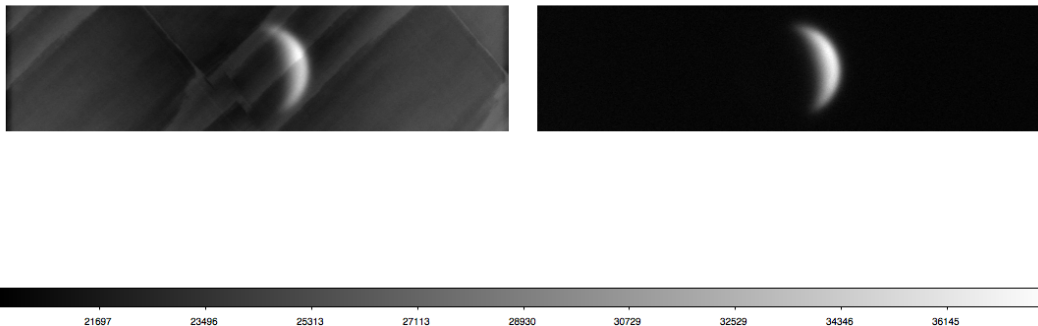


Figure 3.1: 2012/7/17 撮像の金星 左：生画像 右：基本画像処理後

ドの明るさは、基本処理後の画像から金星欠方向に視直径の 2 倍離れたところにある領域の 50×50 ピクセルのカウントを平均した値としている。

- 金星模擬画像

基本画像処理を済ませたそれぞれの金星画像について、対応する金星の位置情報(緯度・経度)を取得し解析時の一括処理のために、観測時の MSI での金星の見かけを再現する模擬画像の作成を行った。模擬画像は NASA の Web ページ HORIZONS Web-Interface → <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi> から、ピリカ望遠鏡のある観測サイトでの撮像時刻ごとの金星情報を取得し用いることでシミュレートした。

取得した金星情報は地球-金星距離, 太陽直下点緯度・経度, 観測(地球)直下点緯度・経度, 見かけの地軸の傾きである。

地球からの金星可視範囲及び金星昼面範囲同定と模擬画像作成のために、まず金星中心から太陽方向と地球方向のベクトルを決定する。本手法では金星は完全な球とみなして処理をする。

用いる定数は,

$$\begin{aligned} \text{金星半径 } r &= 6051.8 + 70 \text{ km} \\ \text{MSI のピクセルスケール } s &= 0.389 \text{ arcsec/pixel} \end{aligned}$$

太陽直下点の緯度, 経度を ψ_{Sun}, θ_{Sun} 観測直下点の緯度, 経度を ψ_{Obs}, θ_{Obs} とし,

$$\text{金星中心から太陽直下点までのベクトル } \vec{L}_S = \begin{pmatrix} r \cos \theta_S \cos(\psi_S - \psi_O) \\ r \cos \theta_S \sin(\psi_S - \psi_O) \\ r \sin \theta_S \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\text{金星中心から観測直下点までのベクトル } \vec{L}_O = \begin{pmatrix} r \cos \theta_O \cos(\psi_O - \psi_O) \\ r \cos \theta_O \sin(\psi_O - \psi_O) \\ r \sin \theta_O \end{pmatrix} \quad (2)$$

である。

次に Figure 3.2 のように金星中心を原点とし, \vec{L}_O の赤道面と平行な成分が X 方向, 中心から北極に向かう方向を Z 方向とする直交座標系 (X, Y, Z) を設定する。また, \vec{L}_O が CCD 面と垂直に交わり画像横方向を y, 縦方向を z とする直交座標系 (x, y, z) を設ける。xyz 座標系は, 原点が CCD 中心と対応し, XYZ 座標系を Y 軸周りに θ_{Obs} 回転させたものと一致する関係にある。

今, CCD 上に映るある点が金星上のどこに対応するかを求める. CCD 上の点 (X_{pix}, Y_{pix}) は以下の式から xyz 座標系に再現することができる.

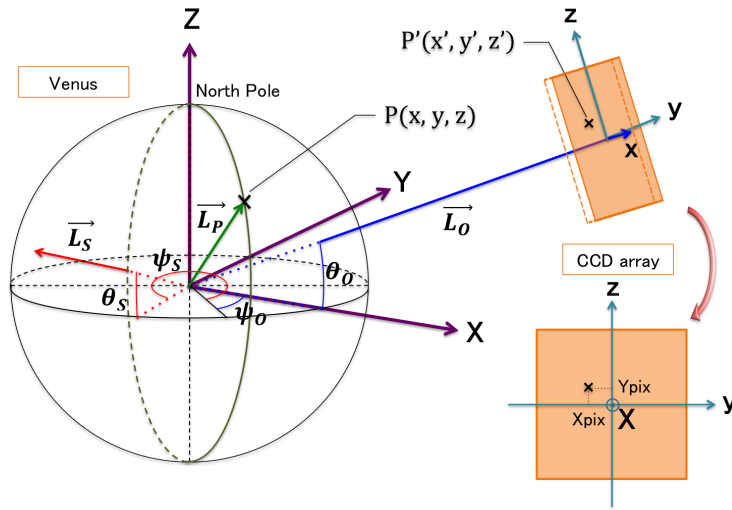


Figure 3.2: 模擬画像作成のための概念図

$$y' = k X_{pix} \tag{3}$$

$$z' = k Y_{pix} \tag{4}$$

$$x' = \sqrt{R^2 - y'^2 - z'^2} \tag{5}$$

但し x は $x > 0$

定数 k は

$$k = \frac{R_s}{60 \cdot 60 \cdot 180 \cdot \pi} \tag{6}$$

R は HORIZONS から得られる地球-金星距離である.
これによって CCD 上の点を $P'(x', y', z')$ として表現できた.

$P' (x', y', z')$ から $P (x, y, z)$ への変換は

$$\vec{L}_P = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_O x' - \sin \theta_O z' \\ y' \\ \sin \theta_O x' + \cos \theta_O z' \end{pmatrix} \quad (7)$$

によって与えられる. 式 (1), (2), (7) によって得られた各ベクトルから Figure 3.4 のような金星を再現する模擬画像を作成する.

$$\frac{\vec{L}_P \cdot \vec{L}_O}{|\vec{L}_P| \cdot |\vec{L}_O|} > 0 \quad (8)$$

$$\frac{\vec{L}_P \cdot \vec{L}_S}{|\vec{L}_P| \cdot |\vec{L}_S|} > 0 \quad (9)$$

以上の計算式を用い, MSI と同じ 512×128 pixel の画像の中心に金星中心が映るとし, 各ピクセル (Xpix, Ypix) に対して式 (8), (9) 満たすものを 1, それ以外のピクセルを 0 とする模擬画像を作成すると以下ようになる.



Figure 3.3: MSI 画像に合わせて作成した金星昼面の模擬画像

- 金星中心の決定と MSI イメージの処理

最後に得られた模擬画像を用い MSI で撮像された金星画像に対して金星中心が画像中心になるように移動し, 画像上 (Ypix 正方向) が金星の北極となるように回転させる. 作成した模擬画像を HORIZONS からの見かけの地軸の傾き情報を元に予め回転させ, MSI の金星イメージと地軸の傾きを揃える. その後 MSI の金星イメージを平行移動した画像と模擬画像を掛けあわせたテスト画像を作成する. このテスト画像は模擬画像の金星中心と MSI のイメージの金星中心が一致した時に最も画像内の全ピクセルのカウント値合計が高くなるはずである. そのため Xpix 方向に $-256 \sim 256$, Ypix 方向に $-64 \sim 64$ 平行移動したテスト画像をそれぞれ作り, すべての試行について画像内の合計のカウント値を計算しその値が最も大きくなる時の平行移動量を求めた.

下図はそれぞれ Xpix, Ypix 方向の移動量に対する画像内の合計カウント値をプロットしたものである. 両プロットにおいてピークを示す (Xpix, Ypix) の解がその画像における金星中心位置を示すことになる.

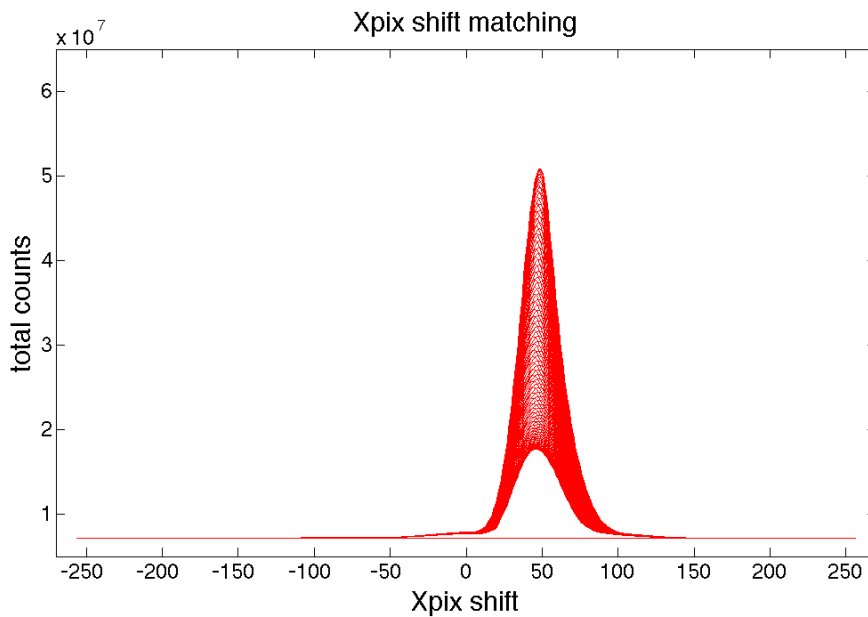


Figure 3.4: 金星イメージと模擬画像の Xpix マッチングによる Xpix 中心決定の結果

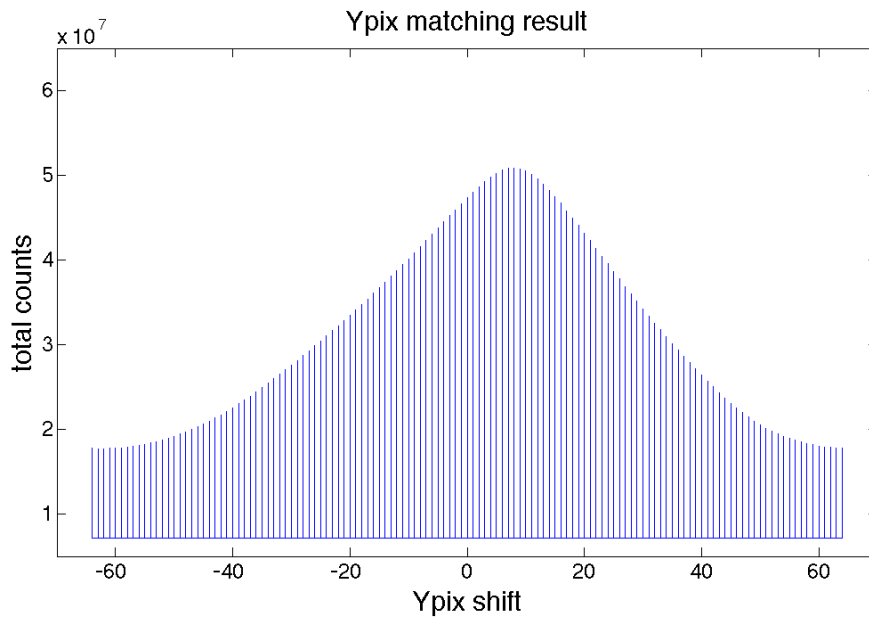


Figure 3.5: 金星イメージと模擬画像の Ypix マッチングによる Ypix 中心決定の結果

以上の操作によって見積もられた金星中心と HORIZONS による見かけの地軸の傾きの情報から MSI の全金星画像は Figure 3.6 のように画像中心が金星中心に、地軸の向きが Ypix 方向に対応したものへと変換される。

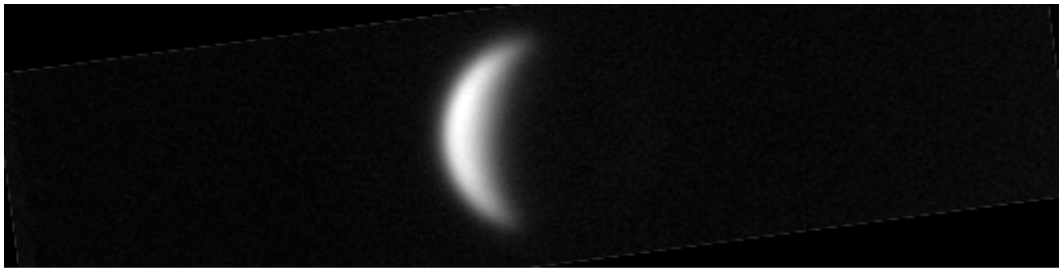


Figure 3.6: 模擬画像を用いて回転・中心移動処理された金星画像

- 金星緯度・経度の決定

本研究では, 金星の緯度ごとのプロファイルに着目するため画像に映る金星が表面の位置が正確に把握され無くてはならない. 必要な金星表面 (雲頂部 高度 ~70 km) 上での位置地点 $P(x, y, z)$ の緯度・経度は, 観測直下点を基準に画像内の各ピクセルの座標から下式によって計算することができる.

$$\text{緯度}\theta = \theta_{Obs} + \sin^{-1}(z/r) \quad (10)$$

$$\text{経度}\psi = \psi_{Obs} + \sin^{-1}(y/r \cos \theta) \quad (11)$$

金星画像は全て前述の処理によって CCD 中心が金星中心と対応するため, 式 (3), (4), (5), (7) の計算から得られる x, y, z と r を用いている.

3.2 画像解析1：緯度プロファイル

模擬画像を用い緯度帯ごとの明るさの変化を捉えるために、各ピクセルごとに計算した緯度・経度情報を元に赤道 $-5^{\circ} \sim 5^{\circ}$ を中心に南北 70° まで 10° 幅の緯度帯を作成し区分けした。 10° の緯度幅について、日の出後の観測を含むため金星画像取得時の正確なシーイングサイズを求めることはできないが、約 2 arcsec だとすると視直径約 33 arcsec に対して妥当な分割幅と判断する。また経度方向の設定幅に関しても、惑星リムと昼夜境界のダークニングによる影響を除くために、 10° とした。見かけの金星昼面内のリムと昼夜境界の間を採用するために金星上の太陽直下点経度と地球直下点経度との間の経度を中心としている。

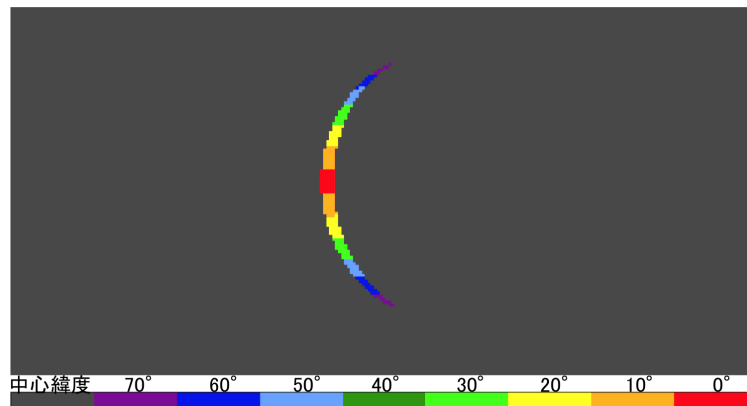


Figure 3.7: 解析に使用する経度幅と緯度帯設定の模式図

3.3 画像解析 2 : 球面散乱補正

金星の太陽直下点は7月の観測時で若干ではあるが北側にある。そのため南半球での明るさは北半球よりも暗く写っている。また、高緯度になるにつれて地球に届く太陽の散乱光は弱くなる。この影響を取り除くために球面散乱による各ピクセルごとの輝度を計算し、3.1 に示した模擬画像と合わせて新たな模擬画像を作成し金星画像の明るさを補正する処理を行った。

球面散乱補正の模擬画像では各ピクセルのカウントは、先の模擬画像作成で使った式 (8), (9) の左辺の値を用いることができる。つまり、観測直下点を最も明るくする球面の見かけは各ピクセルの明るさ B_{Sphere} を、

$$B_{Obs} = \frac{\vec{L}_P \cdot \vec{L}_O}{|\vec{L}_P| \cdot |\vec{L}_O|} \quad (12)$$

として計算でき、下図のように再現することができる。

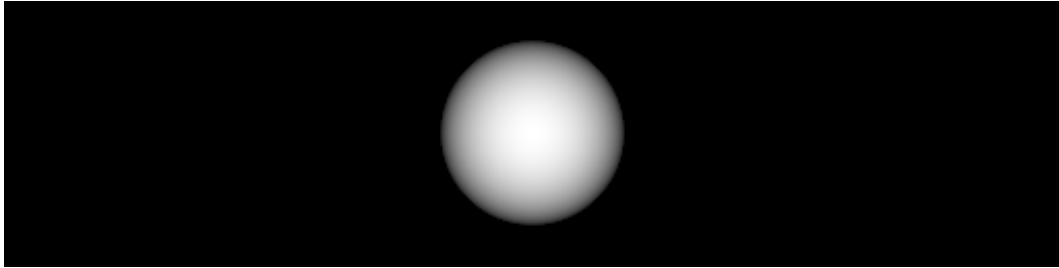


Figure 3.8: 観測直下点からの金星球面の見かけ模擬画像

さらに、太陽照射領域 (金星昼面) を考慮に入れた明るさ $B_{Imitation}$ が以下の積、

$$B_{Imitation} = B_{Obs} \cdot B_{Sun} = \frac{\vec{L}_P \cdot \vec{L}_O}{|\vec{L}_P| \cdot |\vec{L}_O|} \cdot \frac{\vec{L}_P \cdot \vec{L}_S}{|\vec{L}_P| \cdot |\vec{L}_S|} \quad (13)$$

となり、下図のように再現できる。



Figure 3.9: 球面散乱を考慮した金星模擬画像

得られた球面散乱補正後の金星模擬画像をもちいれば, MSI の金星イメージをこの模擬画像で割り算処理することで最終的に以下の様な球面散乱の影響を補正した画像を作成できる.



Figure 3.10: 球面散乱補正後の金星模擬画像

但しこの処理は実際の金星画像と模擬画像の差が大きくなる金星リム付近では信頼性が低下する. そのため, 後に Appendix で掲載する高緯度 (60° , 70°) についての解析結果には人為的変化が写っていると思われる.

4 Results

3.2 の設定によって作られた $10^\circ \times 10^\circ$ のボックス内のカウント値の平均を明るさの参考値として得る。この時、参考値の明るさからはスカイのバックグラウンドの明るさを差引いている。画像間の比較のため本来であれば標準星からのカウント値を基準として補正を行うが、今回は標準星画像がないため赤道の明るさを基準として用いる。これによって1枚の金星画像から南北緯度帯 ÷ 赤道帯のカウント比を計算した。7月のすべての金星画像についてカウント比の時間変化をプロットしたものが Figure 4.1, 4.2 である。(球面散乱補正なし) ここでは先行研究の結果を参照し南北 20° と 40° の変化を代表緯度として載せる。赤の点が北半球側を、青の点が南半球側の各時間の赤道に対する明るさの比率を示している。その他の緯度については Appendix にて掲載している。

7月の観測では晴天に恵まれたため5日間の連続した観測データが存在する。1日の最大観測時間は8時間程であり最小で約1時間毎のプロットが得られている。ほぼ同一の時刻に存在する点はデザリングによって取られた3枚それぞれの示す点であり、エラースケールの指標と見なす。この図から日によって明るさの変化が異なる様子を確認することができる。明るさの日変化の様子を詳しく見るために Figure 4.1, 4.2 を日毎に分割拡大したものを次項以降に掲載する。(Figure 4.3 ~ 4.12) また、Figure 4.13, 4.14 は球面散乱補正を施した場合の図である。これ以降掲載するプロット図はすべてページ上側が南北緯度 20° のもの、下側が南北緯度 20° のものである。

○ 7月観測期間における明るさの日変化を示す。観測期間は 2012/7/17 -2012/7/22 (JST) である。

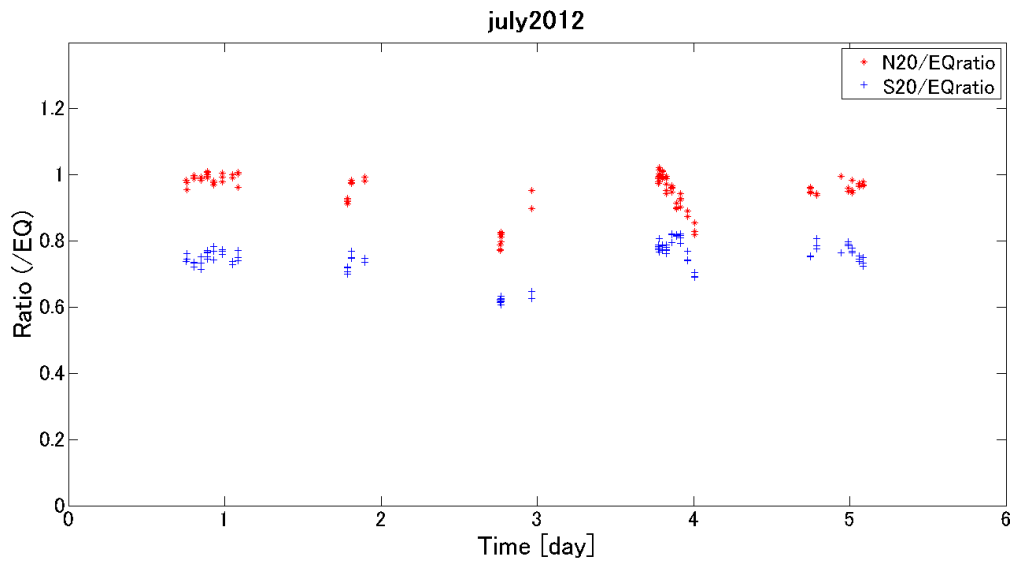


Figure 4.1: 南北緯度 20° 帯プロット図 7月期間

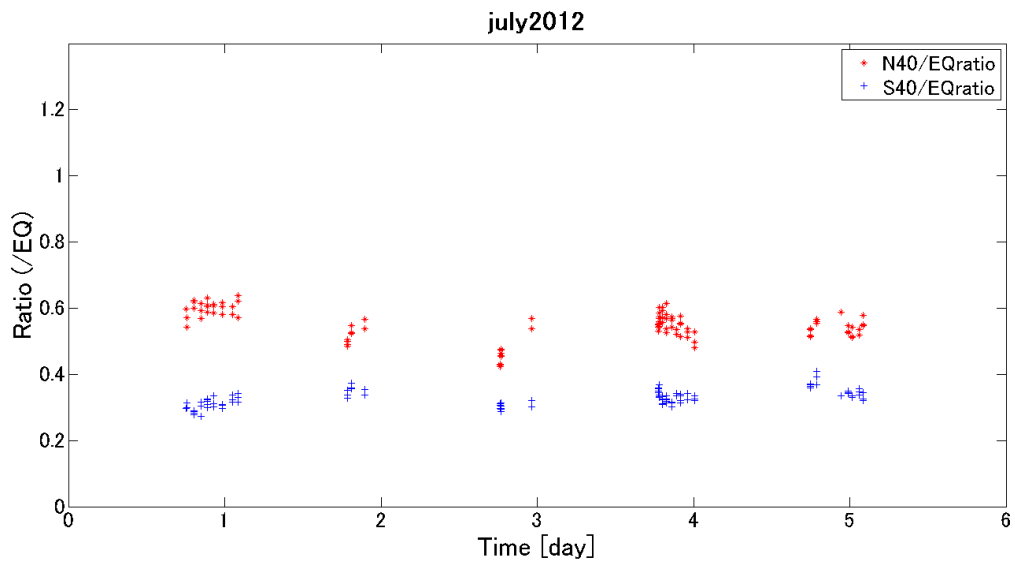


Figure 4.2: 南北緯度 40° 帯プロット図 7月期間

○ 1日の中での明るさの時間変化をプロット. ~ 1日目 ~

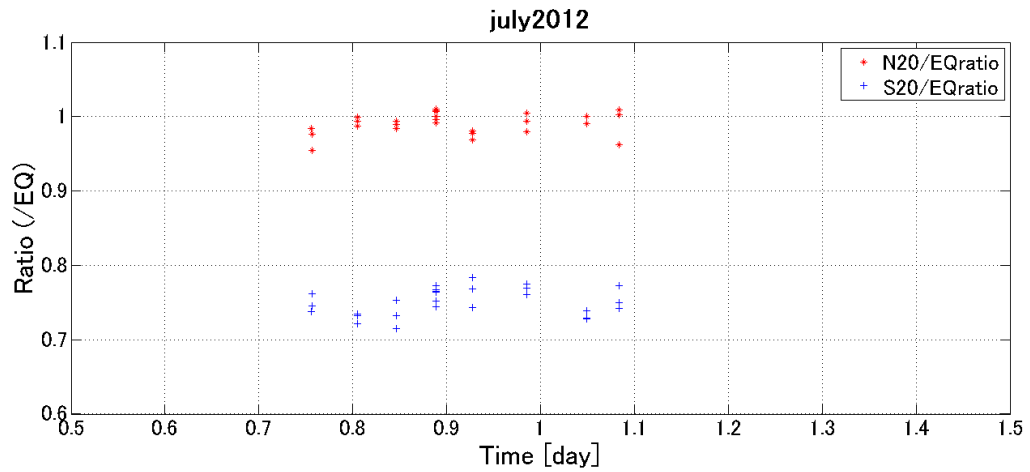


Figure 4.3: 南北緯度 20° 帯プロット図 1日目

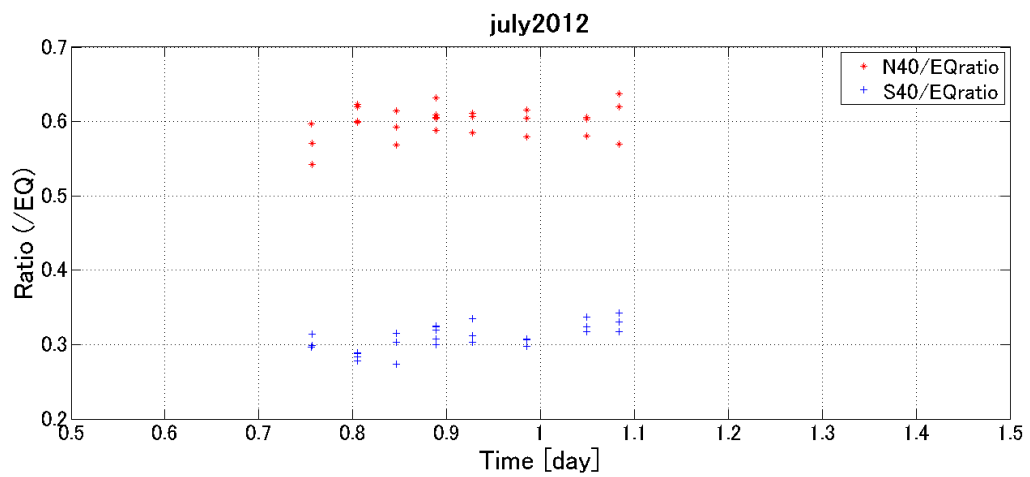


Figure 4.4: 南北緯度 40° 帯プロット図 1日目

- 1日の中での明るさの時間変化をプロット. ~ 2日目 ~

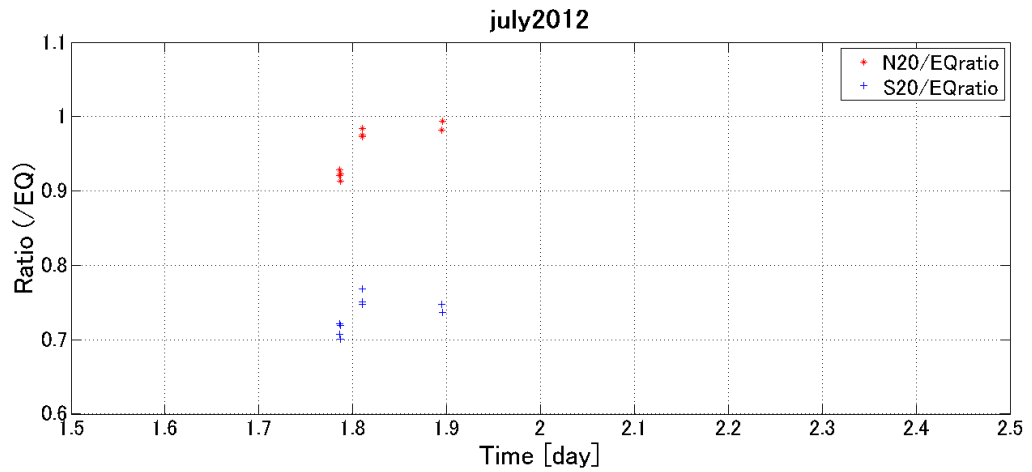


Figure 4.5: 南北緯度 20° 帯プロット図 2 日目

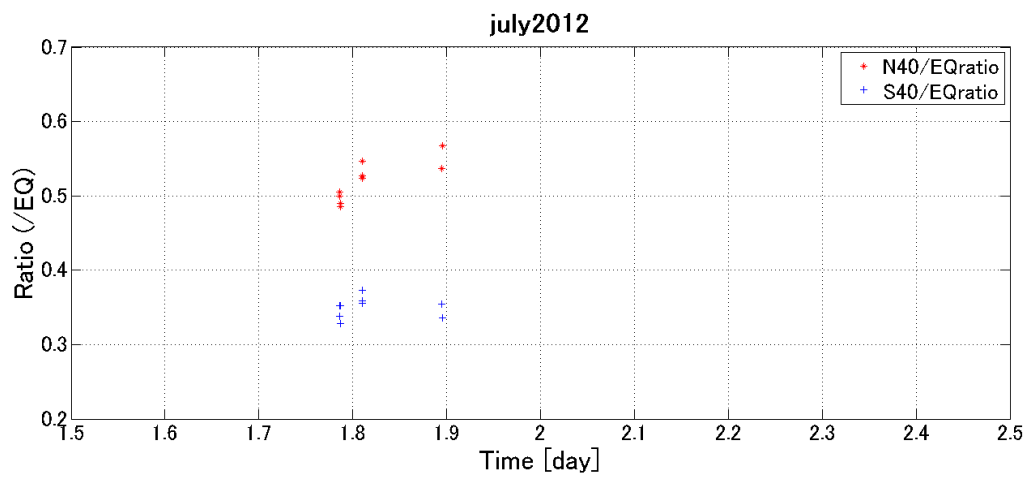


Figure 4.6: 南北緯度 40° 帯プロット図 2 日目

- 1日の中での明るさの時間変化をプロット. ~ 3日目 ~

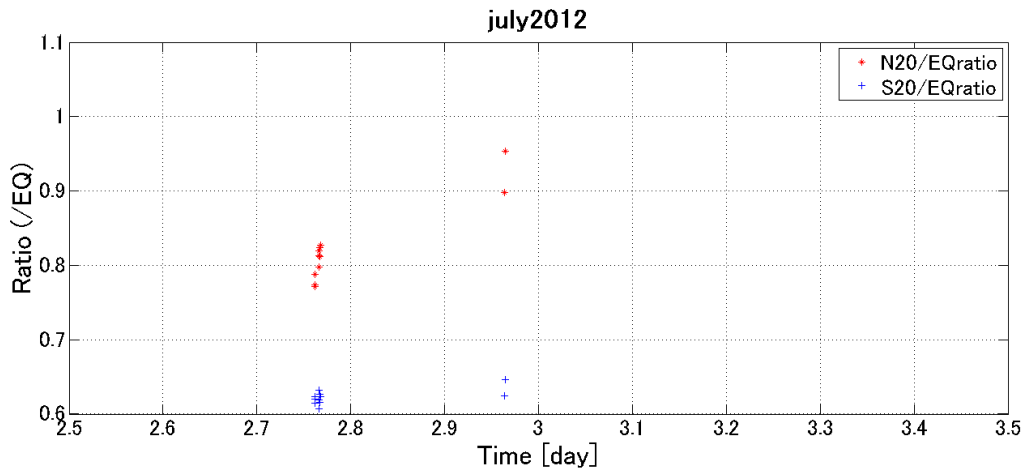


Figure 4.7: 南北緯度 20° 帯プロット図 3 日目

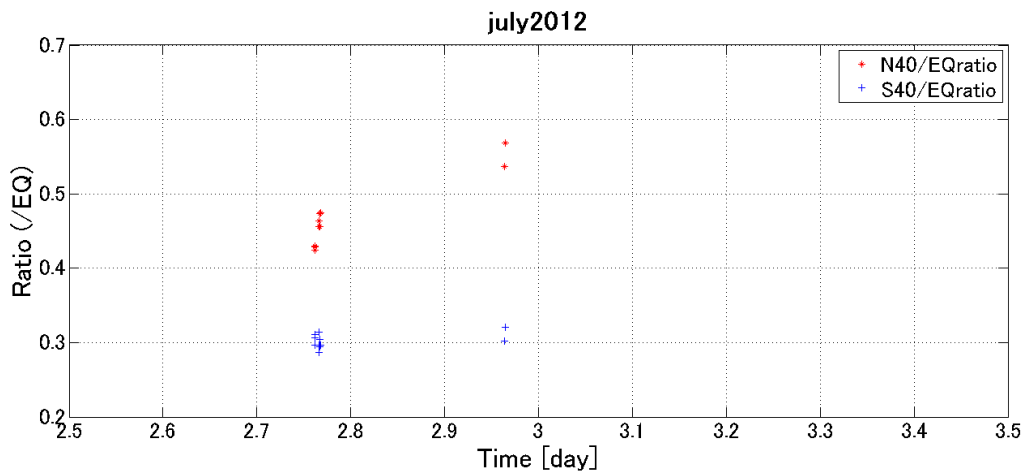


Figure 4.8: 南北緯度 40° 帯プロット図 3 日目

- 1日の中での明るさの時間変化をプロット. ~ 4日目 ~

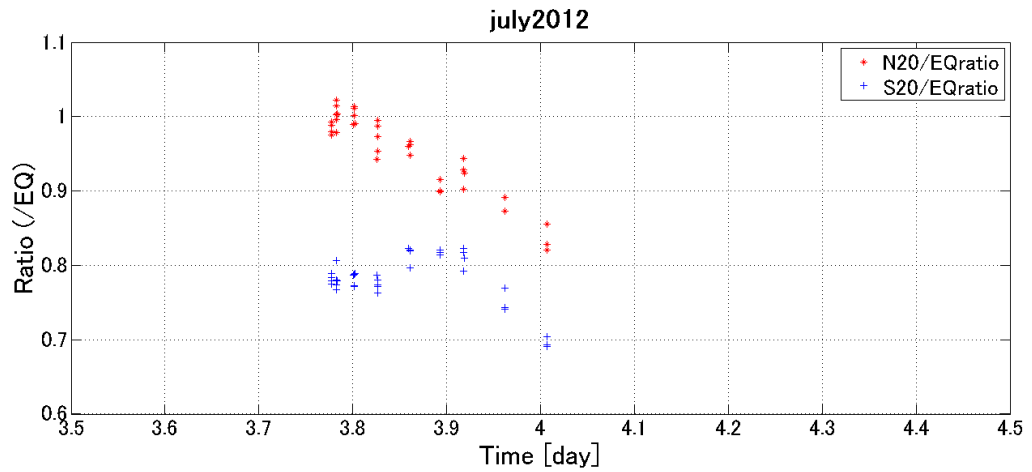


Figure 4.9: 南北緯度 20° 帯プロット図 4 日目

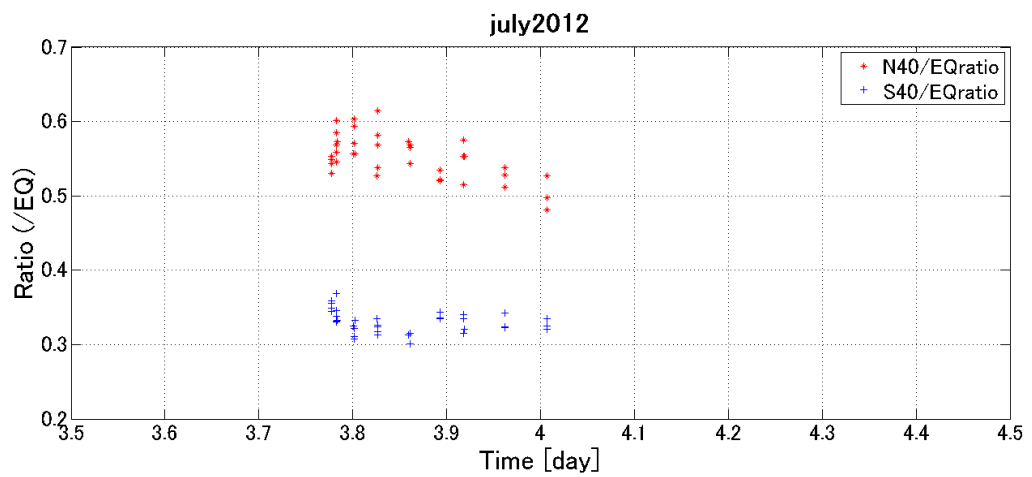


Figure 4.10: 南北緯度 40° 帯プロット図 4 日目

- 1日の中での明るさの時間変化をプロット. ~ 5日目 ~

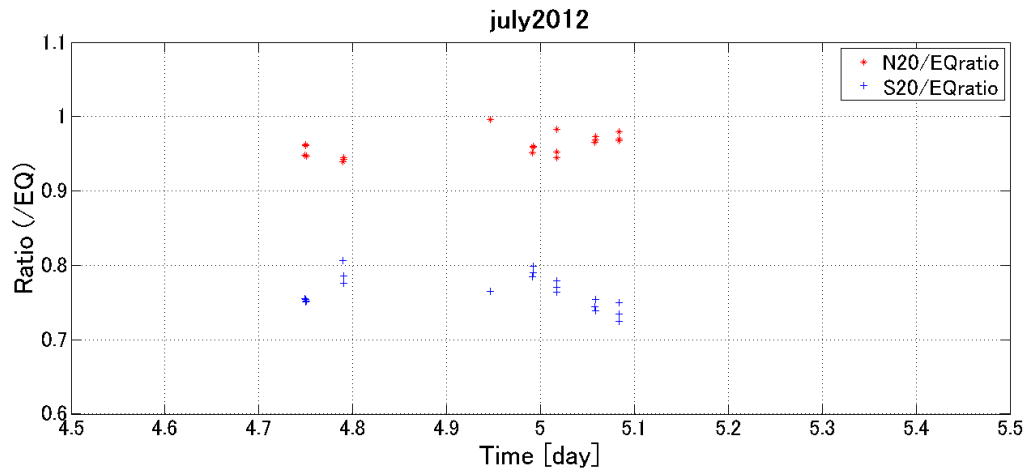


Figure 4.11: 南北緯度 20° 帯プロット図 5 日目

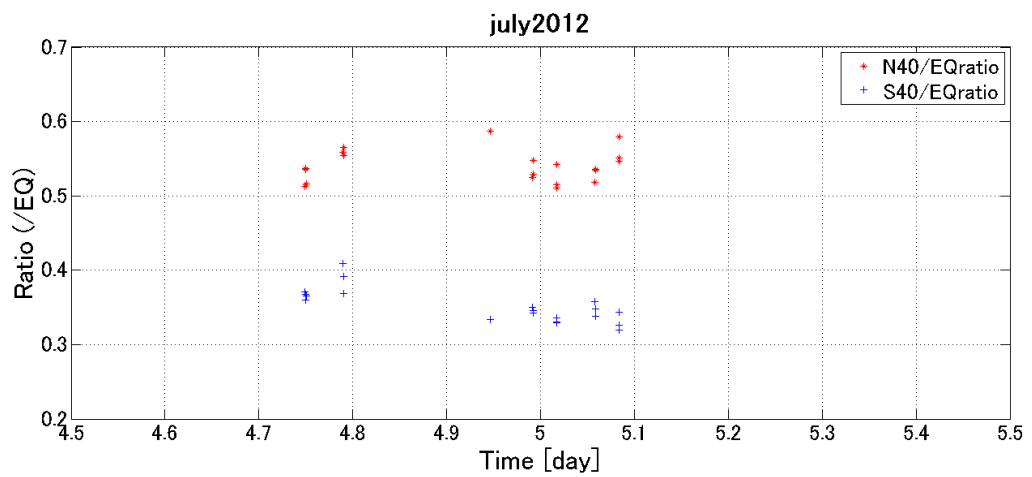


Figure 4.12: 南北緯度 40° 帯プロット図 5 日目

○ Figure 3.4 模擬画像によって明るさを補正した画像でのプロット図.

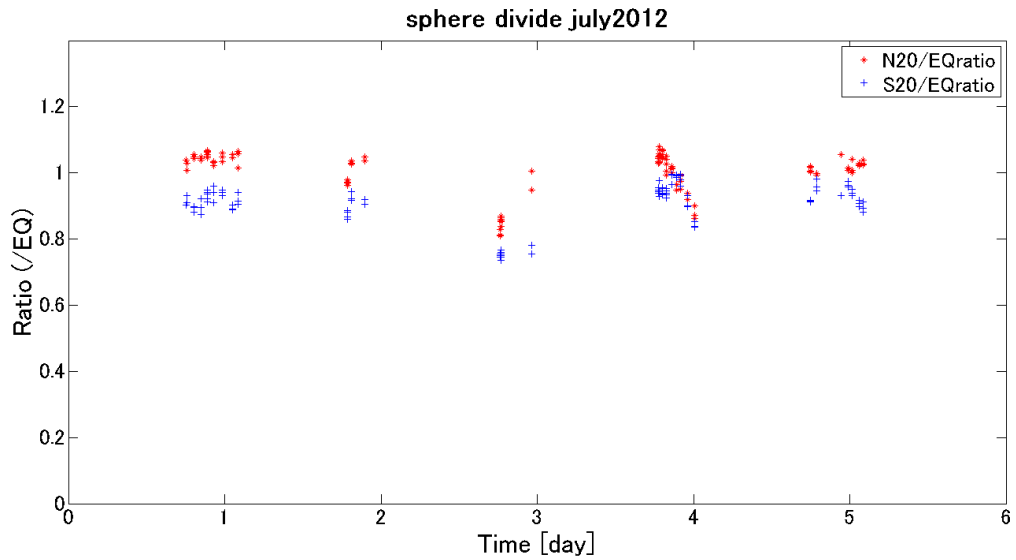


Figure 4.13: 球面散乱補正を施した南北緯度 20° 帯プロット図

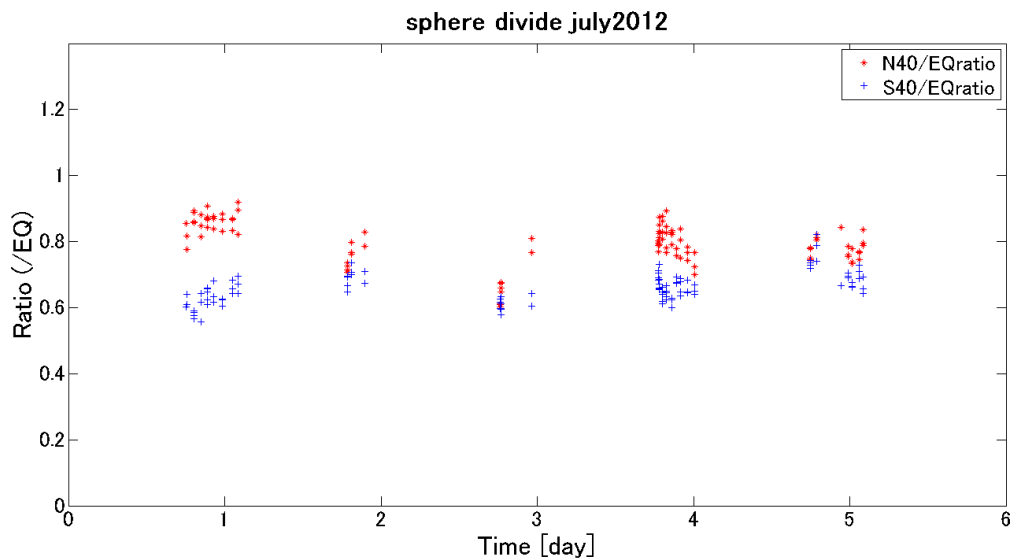


Figure 4.14: 球面散乱補正を施した南北緯度 40° 帯プロット図

5 Discussion

解析によって得られた連続する5日間の明るさの時間変化には、明らかにその日毎で異なった様相が示されていた。特に4日目は観測時間中単調に明るさが減衰している様子が記録されている。今回の結果は赤道の明るさを基準としているため、プロットから分かる明るさの変化は赤道の明るさ増減の影響考慮しなくてはならない。

先行研究 Figure 1.5 の 1979 春の結果は赤道と南北中緯度で最もはっきりとした違いを示す結果となっている。今回の解析ではこの違いに注目し南北 20° 帯と 40° 帯の解析結果をピックアップした。1日の中での変化を見ると南北 20° 帯と 40° 帯の比較では両者の増減の傾向が一致していることが分かる。このことからこの2つの緯度の間に大きな周期の差がなかったという推測ができる。

一方で南北の比較を行うと4日目に北半球にない変化のピークが南半球に示されており、20° 帯と 40° 帯では南半球のみ変化の形が異なる。また、5日目には明るさ変化の対応にズレがある。これらの特徴は、画像解析 2 で示した太陽直下点緯度が北側にある影響と南北の球面による散乱の影響を補正した Figure 4.13, 4.14 でも見ることができ、顕著にその違いが現れている。この原因の1つに、南北での波動の周期変化の位相がズレを考えることができる。緯度方向で一様な周期時に伝搬する紫外模様位相が南半球で遅れているという可能性が示唆され、これは先行研究の結果からは明らかになっていない現象である。

今回解析に使用した金星の 10° 経度幅は赤道で視野角約 2.7 arcsec で観測サイトのシーイングサイズ程度であり、金星上では約 1,050 km の空間スケールに相当する。また緯度 20° では約 990 km, 40° では約 800 km である。これに対して紫外模様の伝搬周期を4日とすると、1時間で模様は 400 km 程度移動するため最大8時間の観測で 3,200 km の空間変化を捉えていることになる。Table.6, 7 は南北 20° 帯と 40° 帯それぞれで Results で1日毎に分割した範囲の中での Ratio(対赤道帯の明るさ)の最大・最小値とその差を載せたものである。Max - Min の値については赤道帯での変化が考慮に入っていないために一概に言うことは難しいが、1日の中で最大で赤道帯輝度の ~ 20% の変化が存在し、この変化は 3,200 km 程度のスケールの模様の影響を反映していることになる。

Day	Max	Min	Max - Min
1	0.9843	0.9620	0.0223
2	0.9940	0.9285	0.0655
3	0.9536	0.7737	0.1799
4	0.9886	0.8203	0.1683
5	0.9671	0.9484	0.0187

Table 5.1: 南北 20° 帯における 1 日の最大・最小 Ratio とその差

Day	Max	Min	Max - Min
1	0.5963	0.5701	0.0262
2	0.5676	0.5051	0.0625
3	0.5682	0.4298	0.1384
4	0.5487	0.4808	0.0679
5	0.5505	0.5128	0.0377

Table 5.2: 南北 40° 帯における 1 日の最大・最小 Ratio とその差

今回の解析から得られた南北緯度帯の赤道帯に対する比率の変化は、上で述べることのなかった他の緯度帯の結果を含め特徴的な変化を内包するデータであることが分かる。しかし、各緯度帯での明るさの絶対的变化を示すものではないため、今回の結果からの議論はあくまで推測の域を出ることがない。次の Summary & Future Work では本研究の目的達成のため、ここまで得られたデータの有用性に触れ、その活用と今後の研究展開を紹介する。

6 Summary & Future Work

Galileo, Pioneer Venus 等の過去の衛星や現在も稼働を続ける Venus Express の金星紫外画像は詳細な紫外模様を捉え、模様自体の研究から明るさ変化や風速計算によって大気ダイナミクスを探る研究まで様々な成果をもたらしている。これに対して本研究は、これらの衛星画像を用いることなくピリカ望遠鏡を用いて衛星の軌道による観測時間と撮像範囲の制限のない地上観測を主体したデータ使用し、定期的なモニタリングをしているところに新規性がある。

本論文では7月の観測結果のから赤道帯の明るさに対する南北低～高緯度までの緯度帯の明るさの時間変化を求めプロットした。これによって緯度帯間の変化が対応していること、瞬間的(～1日)な南北非対称性があること、また赤道帯を基準に1日の観測時間内(～8時間)に最大で低緯度～10%、高緯度～20%の明るさ変化があり観測日によって明るさの変化量に違いが存在ことなどが明らかとなった。また、画像解析2の球面散乱補正は南北の明るさの差を修正し有効な手段であることが明らかとなった。特にこの処理によって可能性が示唆された南北での周期変化の位相のズレは、赤道傾斜角の小さい金星において見られる数少ない南北非対称な現象の一つとして大変興味深い。今後の金星継続観測でモニタリングし、時間発展などを調査項目として有意義である。

一方で、今回の解析結果では各緯度帯の明るさが絶対的にどのように変化しているかを判断するには不十分であることがはっきりした。第一目標である各緯度帯での周期の決定にはさらなる解析の工夫や衛星データの補助利用を検討しなくてはならない。

明るさの絶対的な変化を得るために最も有効と考えられるのは Venus Express の VMC (Venus Monitoring Camera) データを利用することである。Venus Express は金星を南半球に近地点をもち極軌道で周回する現行の衛星でピリカ望遠鏡での観測期間は VMC の稼働時期と合うように設定している。衛星画像は地上観測と異なり地球大気による補正を必要としないため、VMC 画像から南半球の中緯度帯の明るさの絶対的な変化を求めることが可能となれば、MSI での今回の結果と組み合わせることで金星の各帯の明るさの絶対的な変化を新たに得ることができると期待される。

また本研究の特徴は、MSI の特徴を生かした複数波長観測である。金星の 365 nm の吸収物質は未同定であり、近紫外スペクトルの詳細を記録した例は無い。そのため解析結果の波長間比較は、模様伝搬速度の波長ごとの調査は今まで衛星画像ではなされていないため新たな発見につながる可能性がある。

今後は7月以外の観測期間にも本論文で紹介したものと同様の解析を実施し、金星大規模循環の様子とその変化の時間スケール調査、金星の軌道パラメータや太陽との関係性などに着目しスーパーローテーション解明を目指していく。

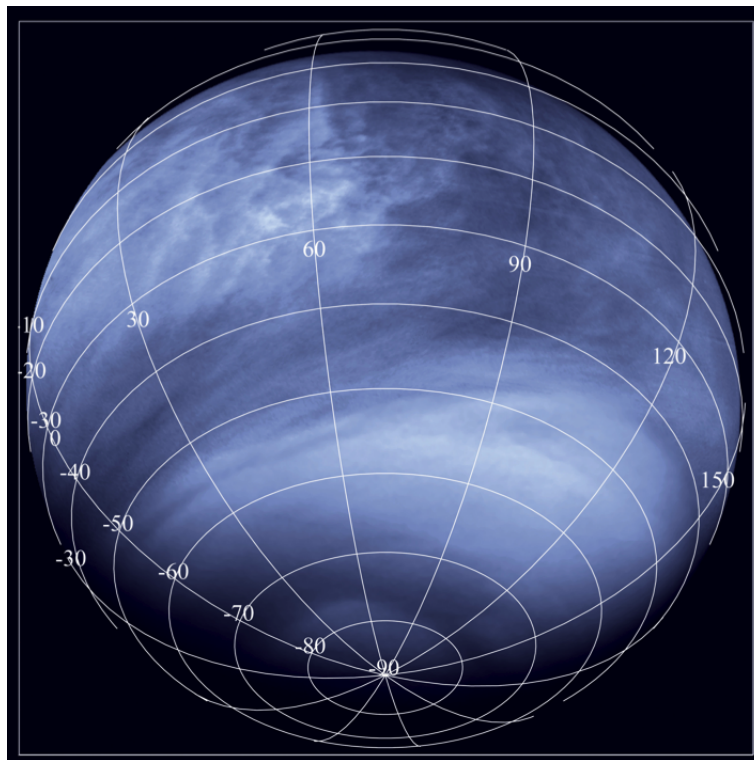


Figure 6.1: 約 30,000 km の距離から撮像された VMC の金星イメージ VMC の UV フィルターは中心波長 365 nm, バンド幅 40 nm である

7 Appendix

Results で紹介しきれなかった南北緯度 $10^\circ - -70^\circ$ 帯の赤道帯に対する明るさ比率の時間変化図を掲載する.

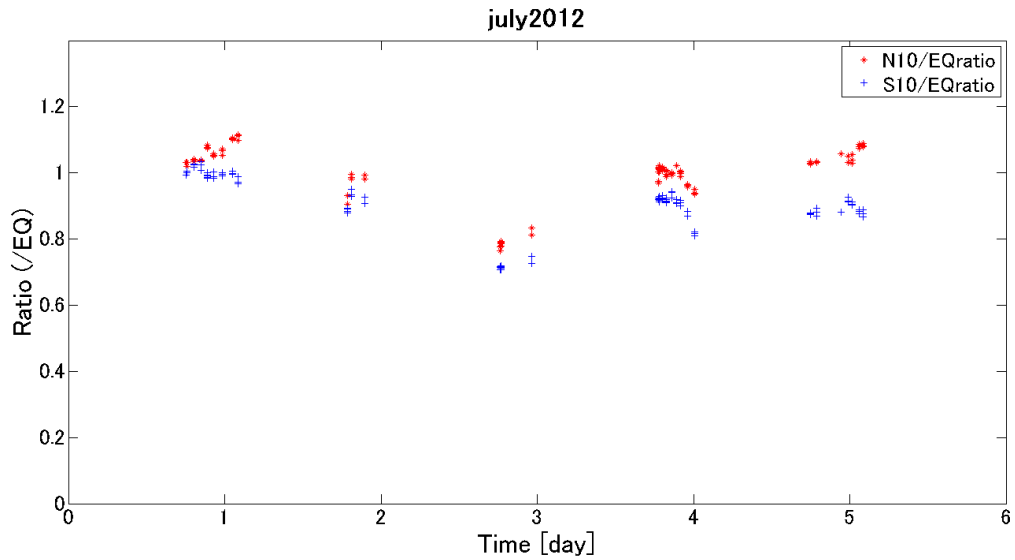


Figure 7.1: 南北緯度 10° 帯の赤道帯に対する明るさ比率の時間変化図

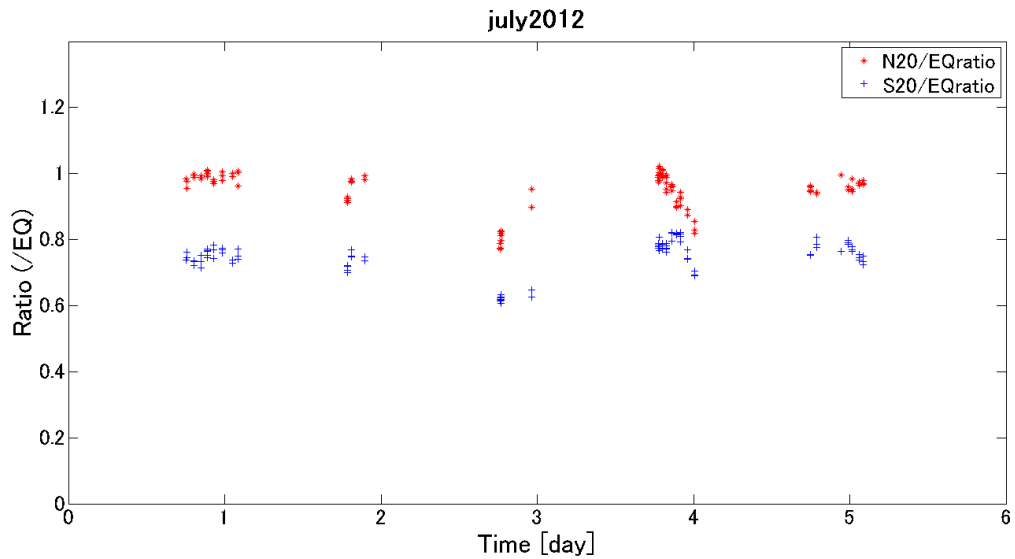


Figure 7.2: 南北緯度 20° 帯の赤道帯に対する明るさ比率の時間変化図

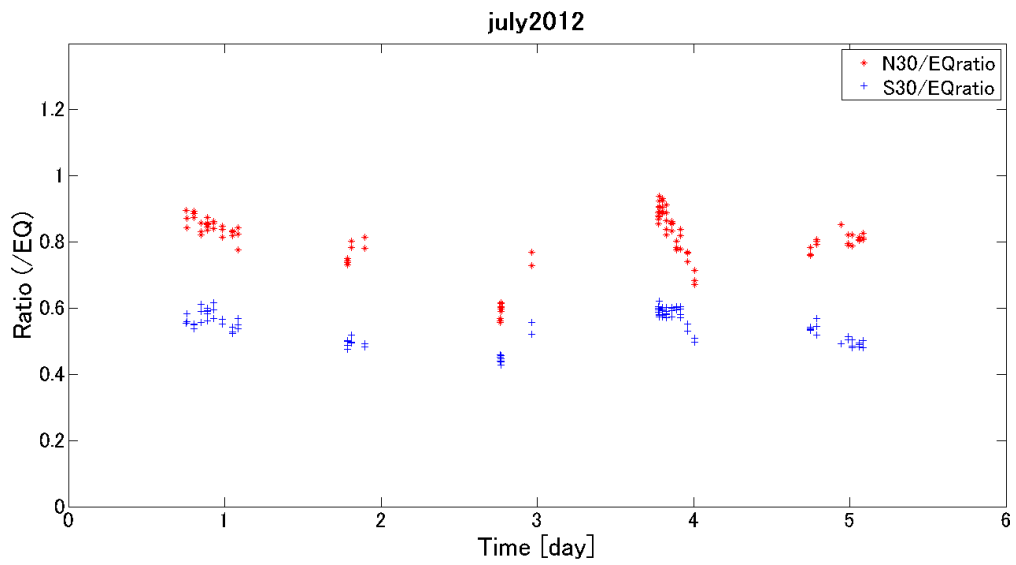


Figure 7.3: 南北緯度 30° 帯の赤道帯に対する明るさ比率の時間変化図

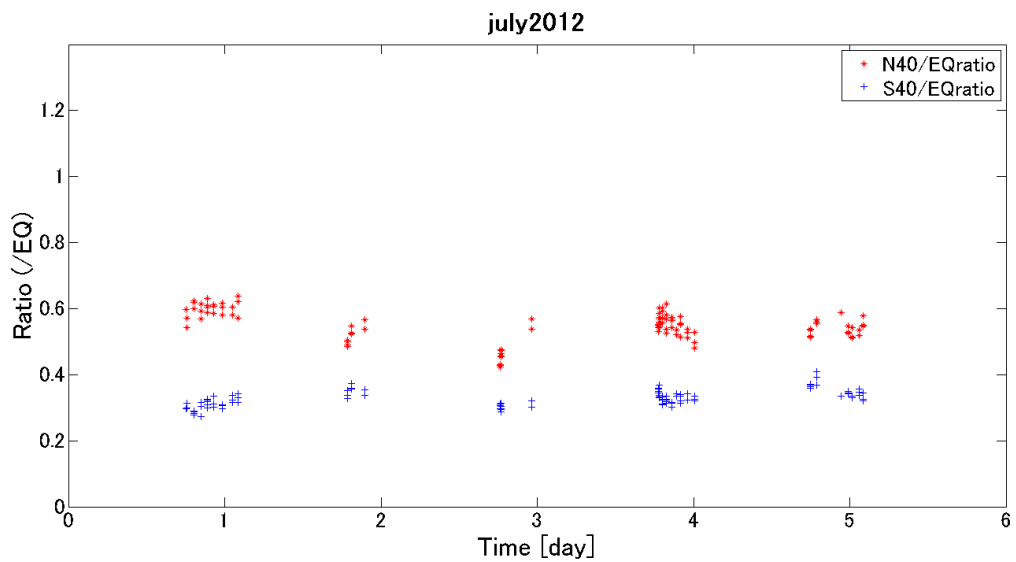


Figure 7.4: 南北緯度 40° 帯の赤道帯に対する明るさ比率の時間変化図

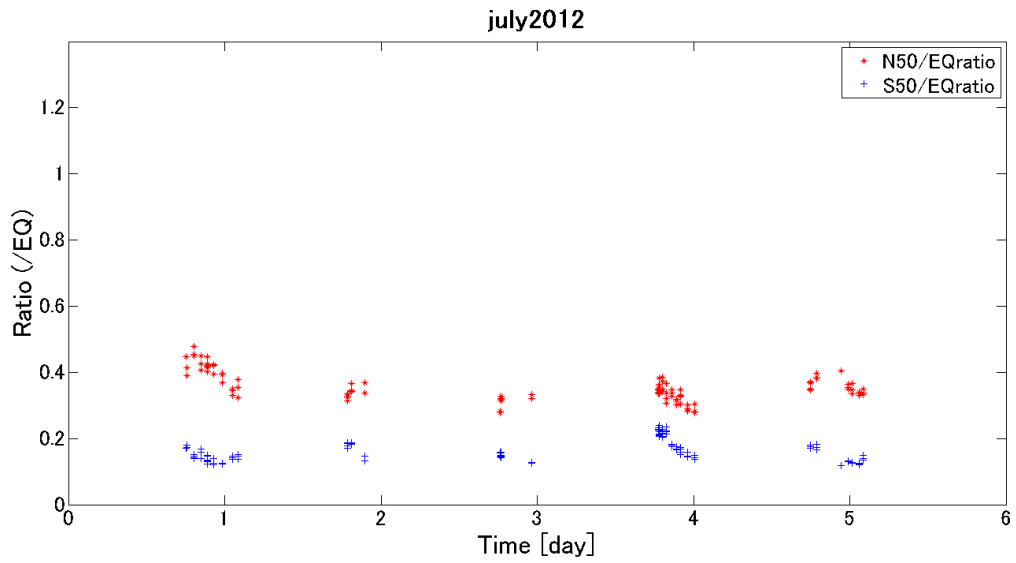


Figure 7.5: 南北緯度 50° 帯の赤道帯に対する明るさ比率の時間変化図

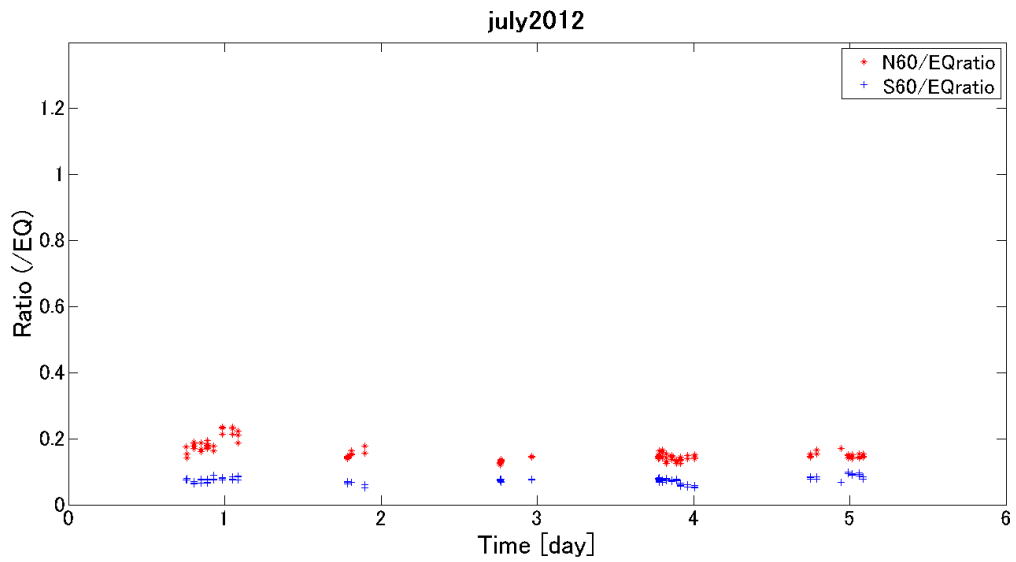


Figure 7.6: 南北緯度 60° 帯の赤道帯に対する明るさ比率の時間変化図

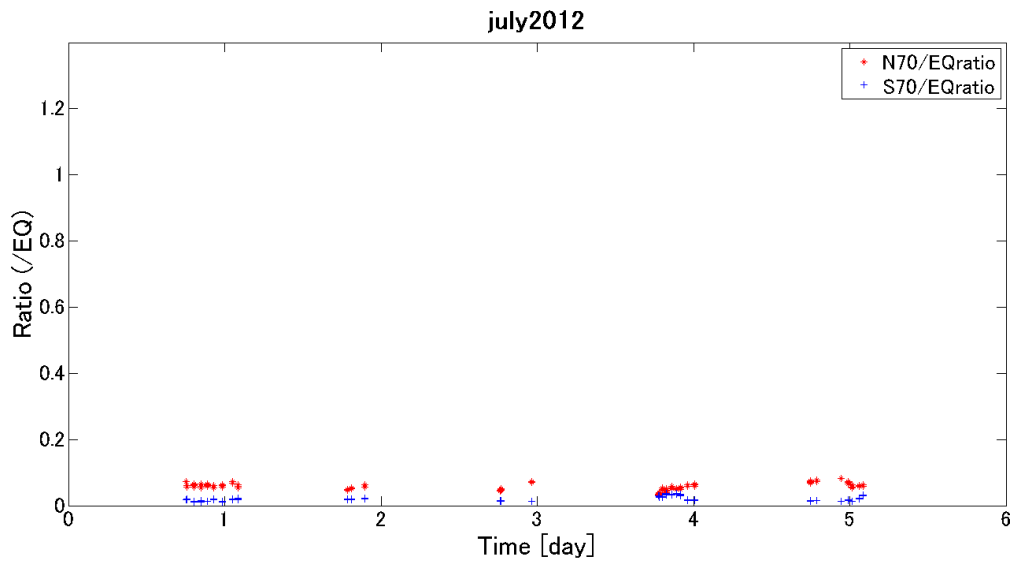


Figure 7.7: 南北緯度 70° 帯の赤道帯に対する明るさ比率の時間変化図

球面散乱補正を施した各緯度帯でのプロット図を掲載する。

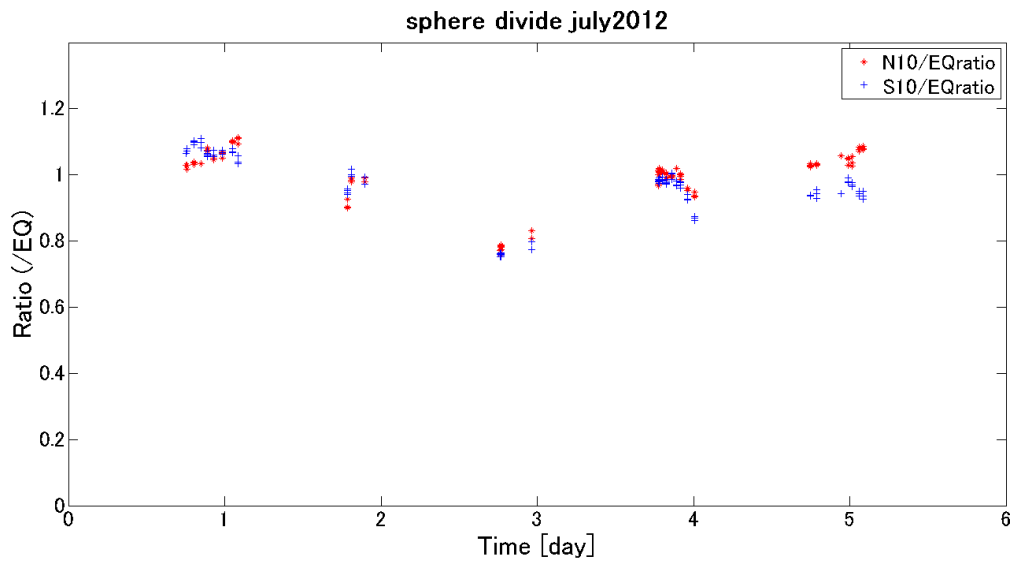


Figure 7.8: 球面散乱補正を施した南北緯度 10° 帯プロット図

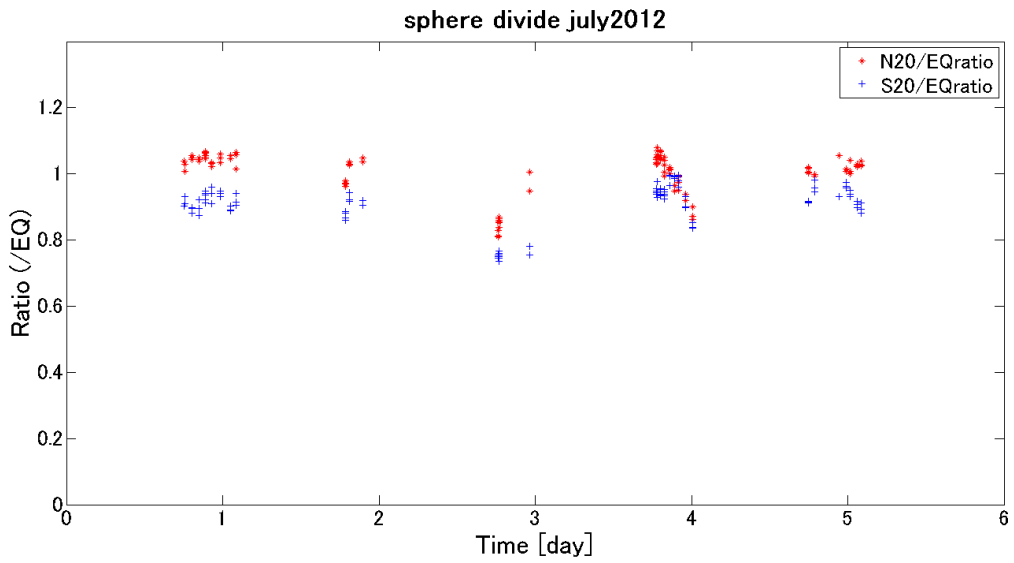


Figure 7.9: 球面散乱補正を施した南北緯度 20° 帯プロット図

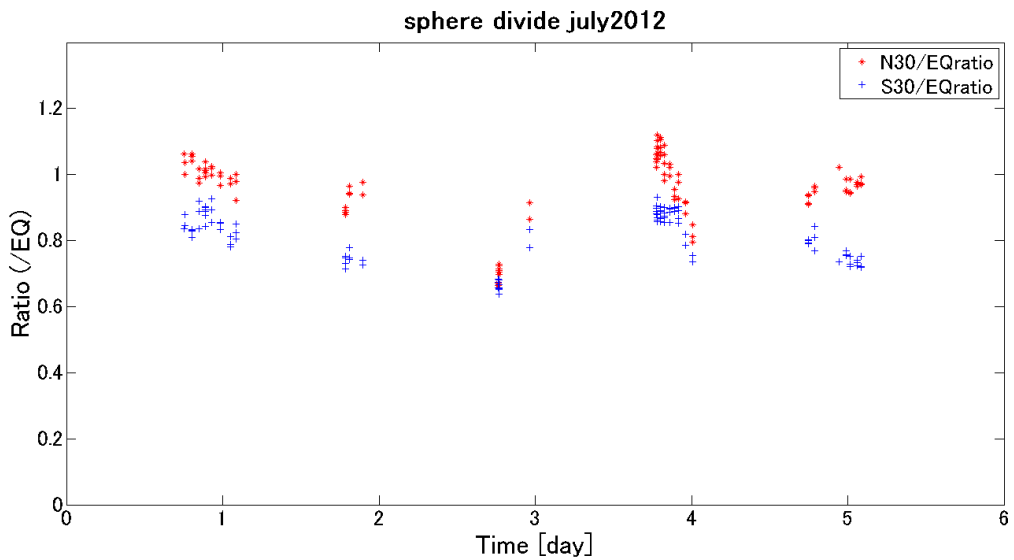


Figure 7.10: 球面散乱補正を施した南北緯度 30° 帯プロット図

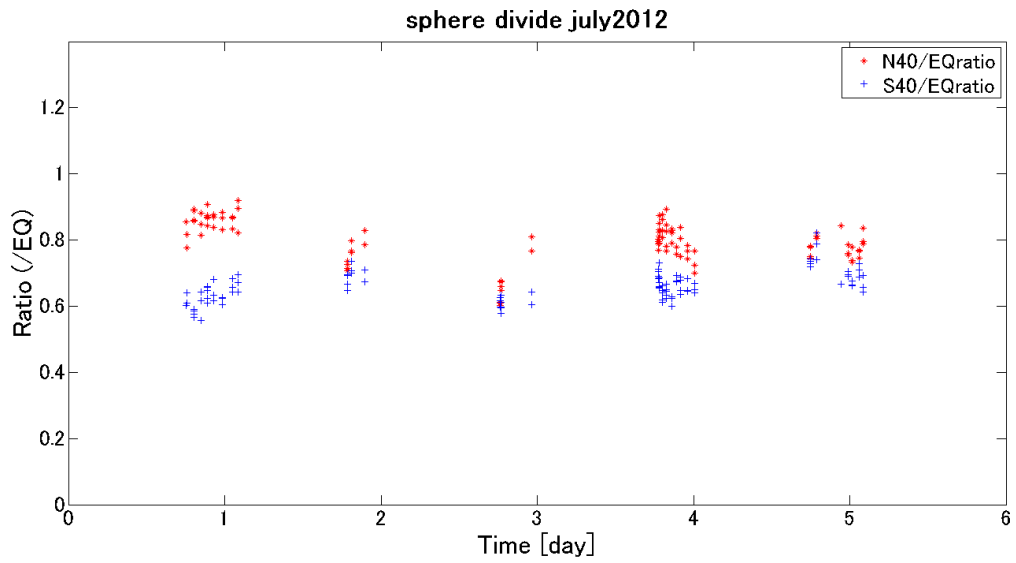


Figure 7.11: 球面散乱補正を施した南北緯度 40° 帯プロット図

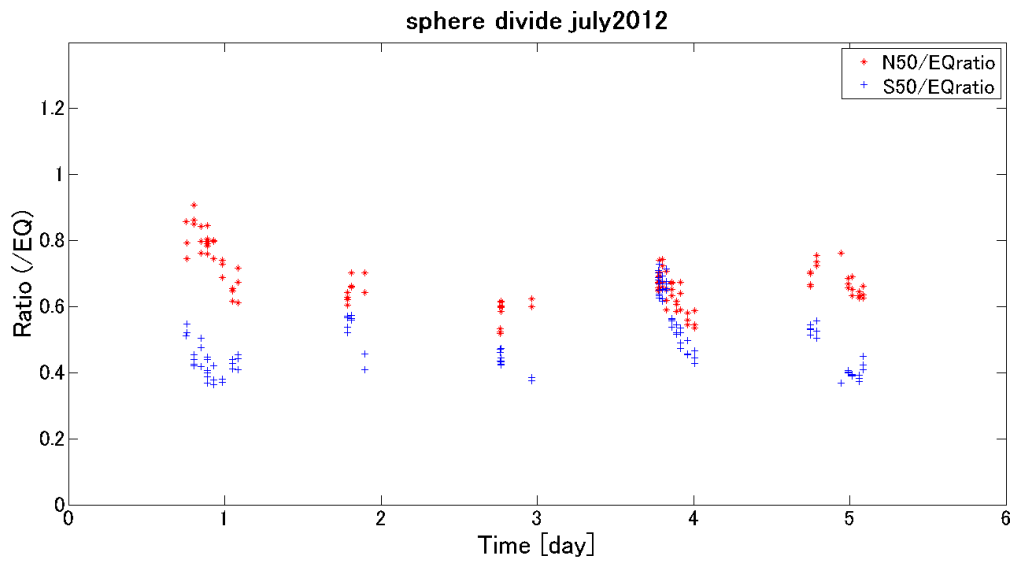


Figure 7.12: 球面散乱補正を施した南北緯度 50° 帯プロット図

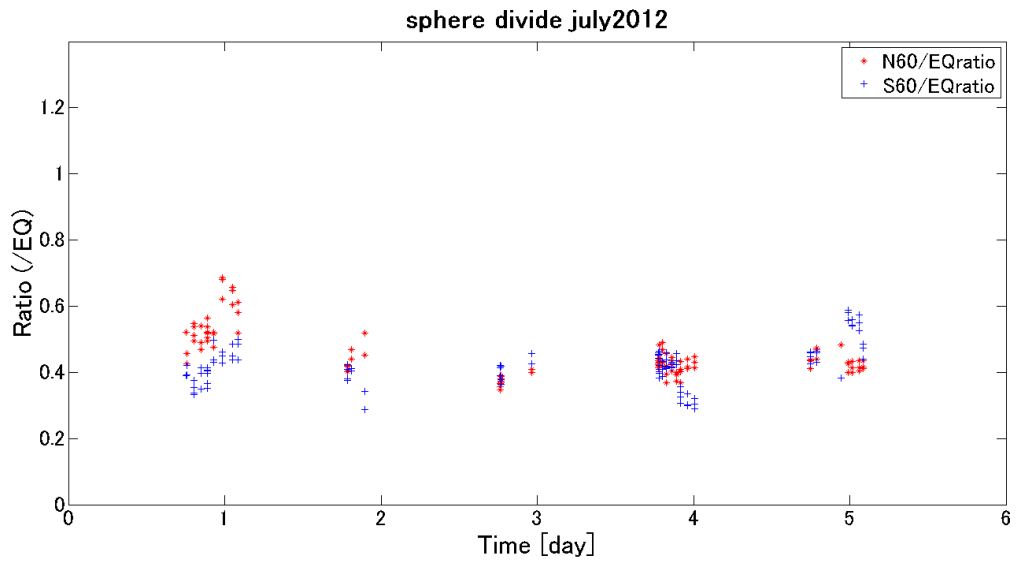


Figure 7.13: 球面散乱補正を施した南北緯度 60° 帯プロット図

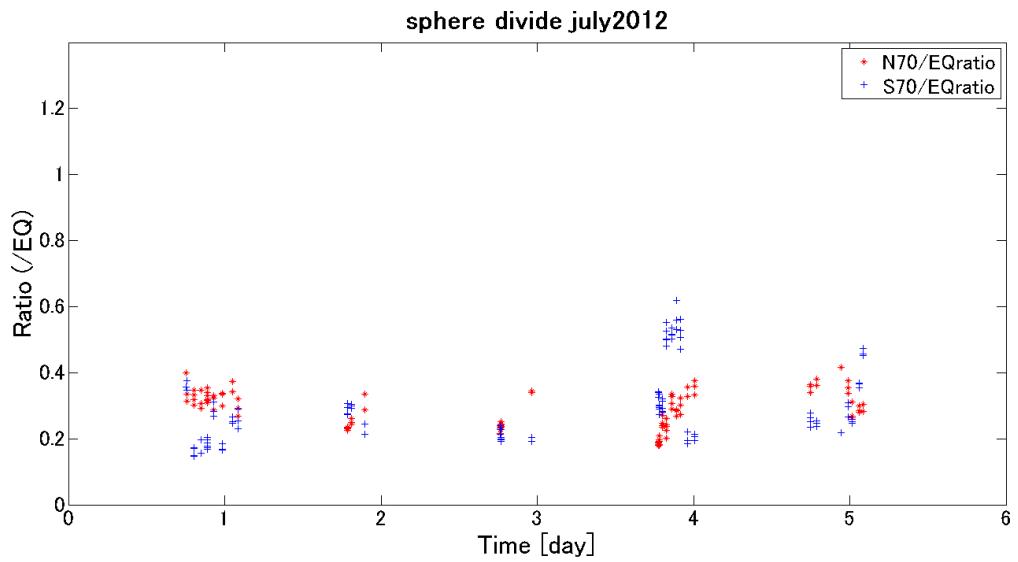


Figure 7.14: 球面散乱補正を施した南北緯度 70° 帯プロット図

8 Acknowledgments

本研究に際しまして、多くの方々からご指導・ご協力を頂きました。

指導教官の高橋 幸弘 教授には本研究を始めるきっかけとアイデアを頂き、研究者としての研究の取り組み方から発表資料や論文作成まで、大変多くのことを教えて頂きました。

渡邊 誠 特任助教にはピリカ望遠鏡と装置の扱い方を丁寧に教えて頂き、光学関係の知識に乏しい自分に天体観測に関する多くのことを学ぶ機会を与えてくださいました。

福原 哲哉 特任助教には本研究の背景知識となる金星の大気波動のお話をして頂き、また金星研究をされる多くの方々と知り合う貴重な機会を与えて頂きました。

濱本 昂 先輩にはデータ解析の手法など一年を通して常にお世話になりました。

またそのほかにも、惑星宇宙グループの皆さま及び佐野康夫 氏をはじめとする名寄市立天文台職員の皆様には研究・観測を進める上で大変お世話になりました。

この場を借りて厚く御礼申し上げます。

9 References

- Del Genio, A. D., Rossow, W. B. (1982), Temporal variability of ultraviolet cloud features in the Venus stratosphere., *Icarus*, 51, 391-415.
- Del Genio, A. D.; Rossow, W. B. (1990), Planetary -scale waves and the cyclic nature of cloud top dynamics on Venus., *J. Atmos. Sci.*, 47, 293-318.
- Molaverdikhani, Karan; McGouldrick, Kevin; Esposito, Larry W. (2012), The abundance and vertical distribution of the unknown ultraviolet absorber in the venusian atmosphere from , sis of Venus Monitoring Camera imges, Issue 217,648-660.
- Peralta, J.; Hueso, R.; S nchez -Lavega, A. (2007), Cloud brightness distribution and turbulence in Venus using Galileo violet images, *Icarus* 188, 305-314
- Peralta, J.; Hueso, R.; S nchez -Lavega, A. (2007), A re, sis of Venus winds at two cloud levels from Galileo SSI images, *Icarus* 190, 469-477
- Rossow, W.B., Del Genio, A.T., Limaye, S.S., Travis, L.D., Stone, P., 1980. Cloud morphology and motions from Pioneer Venus images. *J. Geophys. Res.* 85, 8107-8128.
- Rossow, W.B., DelGenio, A.D., Eichler, T., 1990. Cloud-tracked winds from pioneer Venus OCPP images .*Journal of the Atmospheric Sciences* 47, 2053-2084.
- Watanabe, M., Y. Takahashi, M. Sato, S. Watanabe, T. Fukuhara, K. Hamamoto, A. Ozaki (2012), MSI: visible multi-spectral imager for 1.6-m telescope of Hokkaido University, SPIE, 8446, 84462O-84462O-10.
- 松田佳久, 2011, 「惑星気象学入門」, 岩波書店