

金星紫外線反射率の時間変動 に関する研究

田中 篤行

岡山大学 大学院 自然科学研究科 地球科学専攻

2016/02/12

要旨

金星の紫外線反射率は、紫外線を散乱する雲粒のサイズと紫外線を吸収する物質の分布によって決まると言われているが、その実体は明らかになっていない。弓場 (2010), 遠藤 (2011), はしもと他 (2011) は、Venus Express 探査機に搭載された Venus Monitoring Camera によって取得された金星の紫外線画像を解析し、金星の紫外線反射率が緯度によって異なることと、2006 年 5 月 15 日から 2010 年 8 月 21 日の期間において反射率が減少していることを示した。本研究では 2014 年 5 月 15 日まで期間を伸ばして、金星の紫外線反射率の時間・空間変化についての解析を行った。その結果、解析した期間の南半球の高緯度において、紫外線反射率の時間変化は、はしもと他 (2011) が解析した 1583 周回あたりまでは時間と共に減少したが、それ以降は 2800 周回以降を除いてほぼ一定となっていることがわかった。また、紫外線反射率の空間変化は、解析した期間に依らず、南半球では高緯度ほど反射率が大きくなった。南半球の高緯度において午前より午後の方が紫外線反射率は大きく、低緯度において午前と午後での反射率の違いは見られなかった。

UV reflectivity of Venus is supposed to be related to cloud particles and unknown UV absorber. Yumiba (2010), Endo (2011), Hashimoto et al. (2011) analyzed the UV images of Venus obtained by the Venus Monitoring Camera (VMC) onboard Venus Express spacecraft, and argued that UV reflectivity of Venus varies with latitude and the reflectivity decreased in the period of 21st August 2010 to 15th May 2006. In this study, we analyzed all the UV images obtained by VMC, and examined the temporal and spatial variation of UV reflectivity of Venus. Between 24 and 1583 orbits, our analysis confirmed the decrease of UV reflectivity, which was revealed by Hashimoto et al. (2011). However, UV reflectivity stopped decreasing after 1583 orbits, stayed almost constant till 2800 orbits, and abruptly increased after 2800 orbits. Throughout the period of analysis, UV reflectivity at high latitudes is higher than that at low latitudes, which was also shown by Hashimoto et al. (2011). We found that UV reflectivity shows dependence on the local time. At high latitudes, UV reflectivity is generally higher in the afternoon than in the morning, while there is no distinguishable difference in UV reflectivity between morning and afternoon at low latitudes.

目次

1 序論	1
1-1 研究背景	1
1-2 先行研究	2
1-3 研究目的	2
1-4 Venus Express	3
1-5 Venus Monitoring Camera	4
2 データ処理	5
2-1 画像の選別	5
2-2 幾何情報の計算	6
2-3 反射率の計算	6
2-4 入射角と射出方向	7
2-5 入射角の制限	8
3 反射率の時間変化	9
3-1 反射率の時間変化	9
4 反射率の空間変化	11
4-1 反射率の緯度依存性	11
4-2 反射率の日変化	13

5	まとめ	15
	謝辞	16
	参考文献	17
A	図録 1	18
A-1	緯度 S80 度-S70 度	18
A-2	緯度 S70 度-S60 度	18
A-3	緯度 S60 度-S50 度	19
A-4	緯度 S50 度-S40 度	20
A-5	緯度 S40 度-S30 度	21
A-6	緯度 S30 度-S20 度	22
A-7	緯度 S20 度-S10 度	23
A-8	緯度 S10 度-S0 度	24
B	図録 2	25
B-1	緯度 S80 度-S70 度	25
B-2	緯度 S70 度-S60 度	25
B-3	緯度 S60 度-S50 度	26
B-4	緯度 S50 度-S40 度	27
B-5	緯度 S40 度-S30 度	28
B-6	緯度 S30 度-S20 度	29

B-7	緯度 S20 度-S10 度	30
B-8	緯度 S10 度-S0 度	31
C	図録 3	32
C-1	緯度 S80 度-S70 度	32
C-2	緯度 S70 度-S60 度	32
C-3	緯度 S60 度-S50 度	33
C-4	緯度 S50 度-S40 度	34
C-5	緯度 S40 度-S30 度	35
C-6	緯度 S30 度-S20 度	36
C-7	緯度 S20 度-S10 度	37
C-8	緯度 S10 度-S0 度	38

1 序論

1-1 研究背景

金星は地球に最も近い惑星である。直径は地球の0.95倍、重さは地球の0.82倍と、大きさと重さが地球によく似ている。しかしながら、金星大気は地球大気より厚く、組成も大きく異なっている。(http://www.jaxa.jp/countdown/fl17/overview/venus-j.html)

金星で紫外線を反射している物質は雲粒だと考えられている。雲粒のサイズが変わると反射率が変わる。雲粒のサイズは上昇流や下降流といった鉛直風によって変わる可能性がある。水平方向の風の情報は雲の追跡などから比較的得られやすいが、鉛直方向の風の情報を得ることは難しい。紫外線の反射率を見ることで鉛直方向の風に関する情報を得られれば、金星の大気大循環を考える上で有用な情報となる。(Imamura., 2007)

一方で、金星で紫外線を吸収している物質の正体は明らかになっていない。紫外線は金星に届く太陽光のおよそ10%を占めているので、紫外線吸収物質は金星のアルベドにそこそこ大きな影響を与える重要な物質であると言える。紫外線吸収物質によって金星が太陽光を吸収する量が決まっているのであれば、紫外線吸収物質を調べることは金星の熱収支を調べることに繋がる。紫外線吸収物質の空間的な変動や、時間的な変動を調べることで、未だ明かとなっていない紫外線吸収物質を制約する情報が得られる可能性がある。

1-2 先行研究

金星の紫外線反射率の空間・時間変化を調べた先行研究には、弓場 (2010), 遠藤 (2011), はしもと他 (2011) がある。弓場 (2010) は金星紫外線反射率の入射角, 射出方向依存性と, 緯度依存性を調べた。遠藤 (2011) は金星紫外線反射率の時間変化を調べた。はしもと他 (2011) は金星紫外線反射率の緯度依存性, 時間変化を調べた。これらの研究ではおおまかに二つの結果が得られている。一つは, 反射率の依存性で, 高緯度ほど紫外線の反射率が大きくなるということである。もう一つは, 反射率の時間変化で, 解析した期間において反射率が減少したことである。図 1-1 ははしもと他 (2011) のもので, 紫外線反射率の時間変化を示したものである。縦軸は反射率, 横軸は時間である。反射率は時間とともに減少していることがわかる。

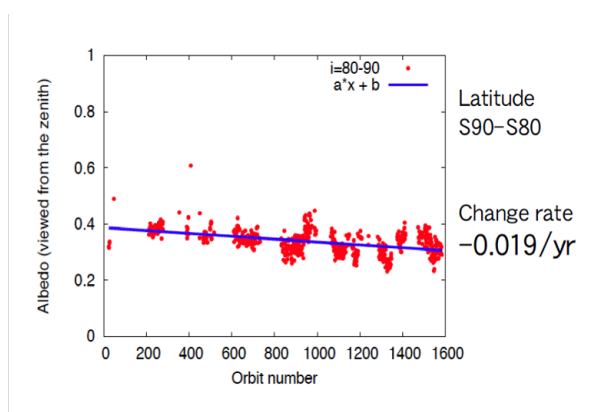


図 1-1: はしもと他 (2011) の反射率の時間変化。縦軸は射出方向が天頂方向 5 度以内の紫外線反射率, 横軸は時間である。orbit number の 1 は 1 日に対応している。

1-3 研究目的

本研究は金星の紫外線反射率の空間・時間変化を調べた。(弓場 (2010), 遠藤 (2011), はしもと他 (2011)) は 2006 年 5 月 15 日から 2010 年 10 月 21 日までの約 4 年半の期間を解析したのに対し, 本研究では 2014 年 5 月 15 日まで伸ばした。これによって解析に用いた期間は先行研究のおよそ 2 倍となる。そして, 本研究では時間変化と緯度依存性に加えて日変化を調べた。時間変化と緯度依存性は先行研究でも調べられているが, 解析する期間を伸ばすことによって時間変化と緯度依存性が変わるかどうかを見るとともに, 先行研究では調べられていない日変化についても調べた。

1-4 Venus Express

Venus Express(図 1-2) はヨーロッパ宇宙機関 ESA が打ち上げた探査機である (Svedhem et al., 2009). 金星の北極上空で近金点, 南極上空で遠金点をとる極軌道で金星のまわりを周回している (図 1-3 参照). 軌道周期は 24 時間である. 2005 年 11 月 9 日に打ち上げられ, 2006 年 5 月 7 日に金星を 24 時間で周回するような軌道に投入された. その後 2014 年 5 月 15 日まで同軌道で様々な観測を行った. 現在は運用されていない.

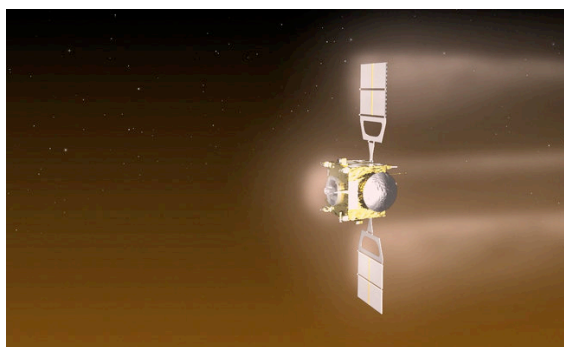


図 1-2: Venus Express. <http://www.esa.int/spaceinimages/> から引用.

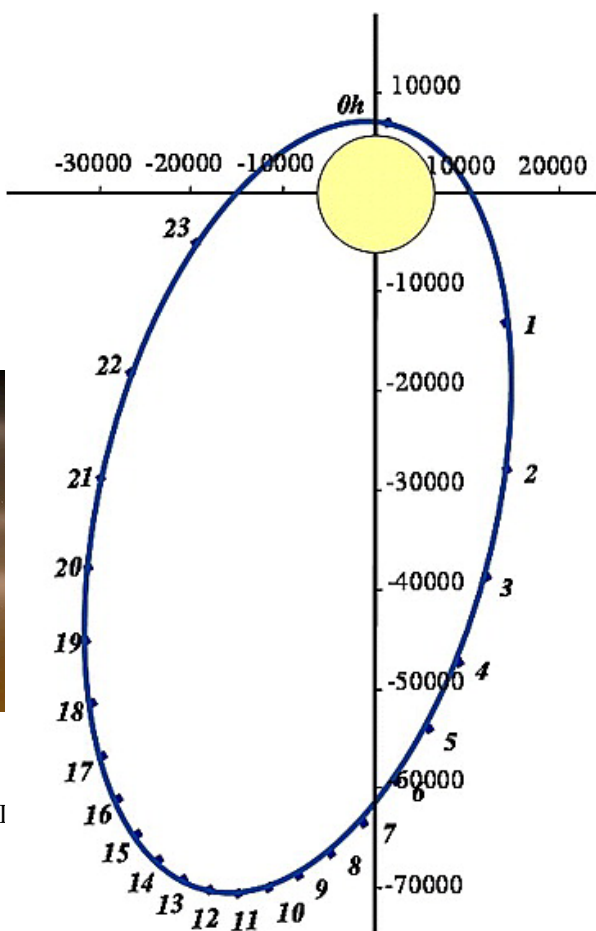


図 1-3: Svedhem et al.(2009) の Venus Express の軌道. 横軸は金星の公転面, 縦軸は公転面に直交する方向. 北極は正の縦軸の付近, 南極は負の縦軸の付近である. 近金点は北極上空, 遠金点は南極上空である. から引用.

1-5 Venus Monitoring Camera

Venus Monitoring Camera(図 1-4) は Venus Express に搭載された観測装置の一つである (Markiewicz et al., 2007). これは視野角 17.5 度という広角撮像をすることができる測器で, 近赤外線 1(中心波長 1010nm), 近赤外線 2(中心波長 965nm), 可視光 (中心波長 513nm), 紫外線 (中心波長 365nm) の 4 つのフィルターで撮像観測をする. 本研究では中心波長 365nm の紫外線フィルターを使って金星を撮像した画像を解析に使用した. 紫外線画像のサイズは 512×512 ピクセルである.

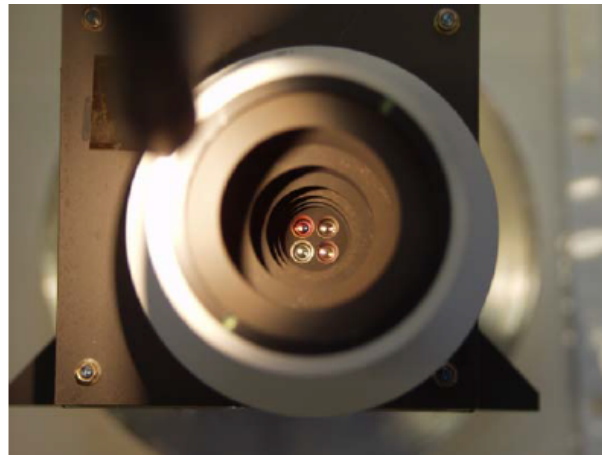


図 1-4: Venus Monitoring Camera. Markiewicz et al.(2007) から引用

2 データ処理

2-1 画像の選別

紫外線画像の中から解析に使用しないものを取り除いた。使用しないものとは、露出時間が長すぎて飽和したもの、実際の金星には無い人工的な模様が写っているもの(図 2-1)である。露出時間が長すぎて飽和したものは自動処理で取り除いた。人工的な模様が写っているものは画像を 1 枚ずつ見て選別した。これらの作業によって残った紫外線画像は 84982 枚である。図 2-2 は解析に使用する画像の例である。

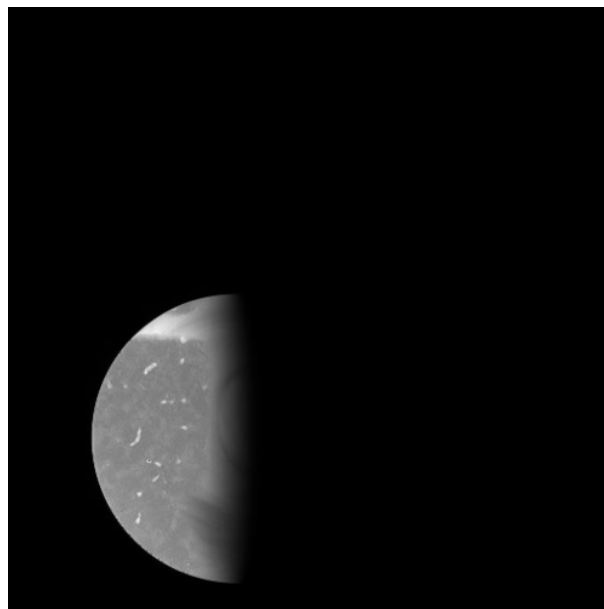


図 2-1: V0259_0009_UV2.IMG

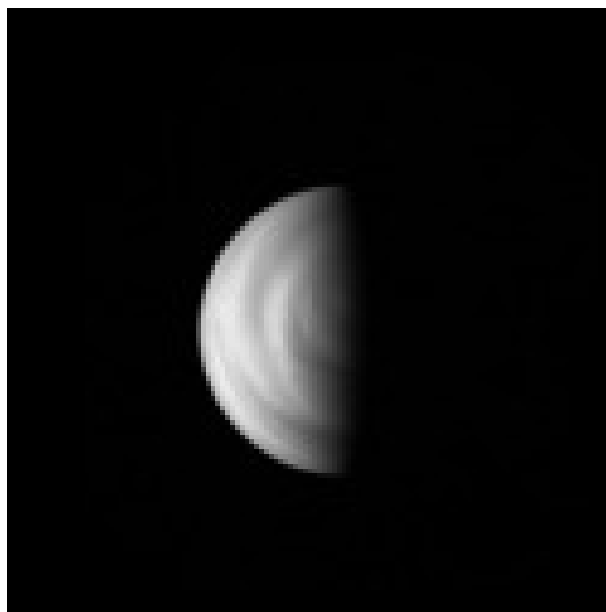


図 2-2: V0024.0124.UV2.IMG

2-2 幾何情報の計算

解析に用いる幾何情報は、はしもと他 (2011) が計算したものを用いた。観測データから撮影時刻を抜きだし、その時刻における太陽の位置、金星の位置、Venus Express の姿勢と位置を調べ、各ピクセルの入射角、方位角、射出角、緯度、経度を計算している。これらには NASA の NAIF が開発した SPICE toolkit が使われている。地方時については、はしもと他 (2011) で計算されていなかったため、自分でプログラムを作成し、計算した。

2-3 反射率の計算

はしもと他 (2011) に従って、反射率 R を次式のように定義した。

$$R(i, e, a) = \frac{\pi \cdot I(i, e, a)}{J \cos i} \quad (2-1)$$

I は Venus Monitoring Camera が観測した輝度、 J は金星軌道での太陽紫外線の輝度、 i は入射角、 e は射出角、 a は方位角である。金星軌道での太陽紫外線の輝度

は地球軌道での太陽紫外線の輝度から推定した。その後、各紫外線画像ごとに各ピクセルの反射率、入射角、方位角、射出角、緯度、経度、地方時を入れたファイルを作成した。

2-4 入射角と射出方向

反射率を決める散乱体、吸収体の分布は空間非一様で、かつ散乱は非等方であるため、反射率は太陽と金星と観測者の位置関係に依存して変わる。そこで、本研究では太陽と金星と観測者の位置関係を太陽光の入射方向 (入射角) と射出方向 (射出角と方位角) で定義した (図 2-3 参照)。入射角は太陽光が入射してきた方向を天頂からの角度で表したものである。射出角は太陽光が反射した方向を天頂からの角度で表したものである。方位角は入射方向に対する射出方向のずれを角度で表したものである。

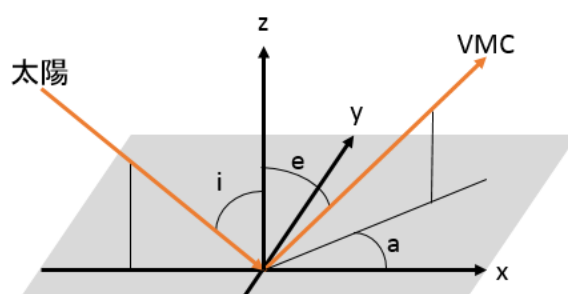


図 2-3: 入射角 i と射出方向 (射出角 e , 方位角 a)。x 軸は太陽の入射方向, y 軸は x 軸と直交する方向, z 軸は天頂方向である。

2-5 入射角の制限

Venus Monitoring Camera で撮像された紫外線画像の各ピクセルのうち，入射角が80度以上のものは反射率が他のピクセルよりもとびぬけて大きくなっている(図 2-4 参照)．これは実際の金星で起こっている現象ではなく，1ピクセルの中に光が入射する場所と入射しない場所が存在することによって生じたものと考えられる．本研究の解析ではピクセル全体に太陽光が一様に入射していると仮定して入射光の輝度を見積もったため，入射光の輝度が過小評価され，反射率が過大評価されたと考えられる．

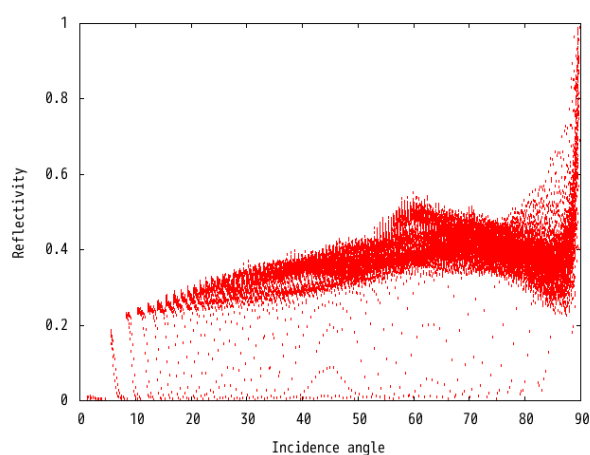


図 2-4: V0024_0124_UV2.IMG における入射角と反射率の関係.

3 反射率の時間変化

3-1 反射率の時間変化

図 3-1 は反射率の時間変化を示した図である。縦軸は紫外線反射率で、横軸の周回数 (orbit number) は探査機が金星のまわりを周回した数である。Venus Express は 24 時間で 1 周するので、1 周回はちょうど地球の一日に相当する。南緯 80-70 度、入射角 70-80 度、射出方向が天頂から 5 度以内のピクセルを抽出し、1 周回毎に抽出された全ピクセルの平均をプロットした。図を見ると、データが無い期間とある期間が交互に存在している。これは金星の公転によって Venus Monitoring Camera が撮像する範囲内に、射出方向が 5 度以内のデータが存在しなくなるからである。固まっているデータの反射率がバラついていてるのは時期によって抽出したデータに偏りが出ているからである (図 3-2 参照)。はしもと他 (2011) は 1583 周回までを解析し、この期間において反射率が減少していると述べたが、本研究でも同様に減少していることが確認できた。しかしながら、1583 周回以降のデータを見ると、反射率が減少する傾向は見えず、2800 周回以降を除いてほぼ一定となっている。また、最後の部分で反射率が大きくなっているが、この原因についてはわからない。他の緯度帯もこの結果と同様な時間変化のパターンを示した (図録参照)。

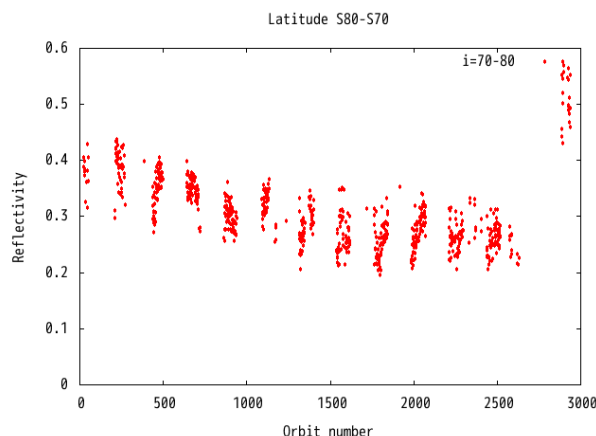


図 3-1: 反射率の時間変化

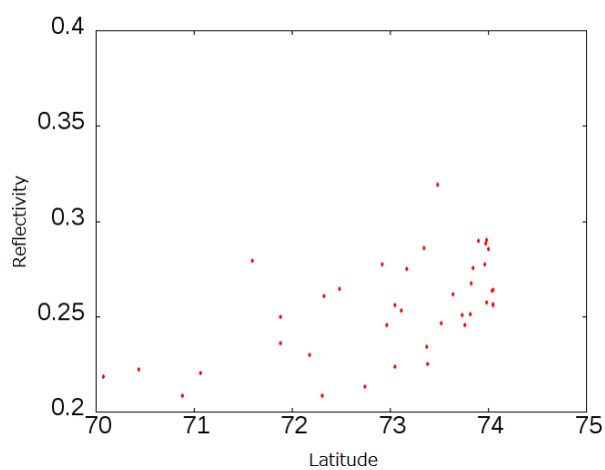


図 3-2: 縦軸は反射率, 横軸は緯度. 南緯 80-70 度, 入射角 70-80 度, 周回数 1980-2030, 射出方向は天頂から 5 度以内のピクセルを抽出し, 各周回数ごとに抽出した全ピクセルの反射率と緯度それぞれの平均をプロットした.

4 反射率の空間変化

4-1 反射率の緯度依存性

反射率の緯度依存性を見るために以下の作業を行った。反射率の時間変化を見る際に使った各緯度帯、各入射角、各周回ごとに反射率を平均したデータがある。金星は球であるため、太陽光の取りうる入射角の範囲は緯度帯によって異なる。つまり、高緯度において入射角の小さい太陽光は存在しない。各緯度帯ごとに、反射率の時間変化を見る際に使った反射率の平均から、すべての緯度帯において存在する入射角 70-80 度のみ抽出し、1583 周回以前と 1584-2700 周回の二つに分け、それぞれ平均した。

図 4-1 は反射率の緯度依存性を示した図である。縦軸は紫外線反射率、横軸は緯度である。射出方向が天頂から 5 度以内のもののみ抽出した。点の一つ一つは抽出した反射率を各緯度帯で分けて、平均したものである。エラーバーは抽出した反射率の平均の標準偏差である。赤と緑は時期が異なっており、赤は 1583 周回までで、これははしもと他 2011 が解析した期間と同じである。緑は 1584 周回から 2700 周回までである。1583 周回以前 (赤) も 1584 周回以降 (緑) も高緯度ほど反射率が大きくなっている傾向が見える。この傾向ははしもと他 (2011) で述べられた傾向である。全体的に 1583 周回以前 (赤) より 1584 周回以降 (緑) の方が反射率は低くなっている。これは反射率が時間変化したからである。

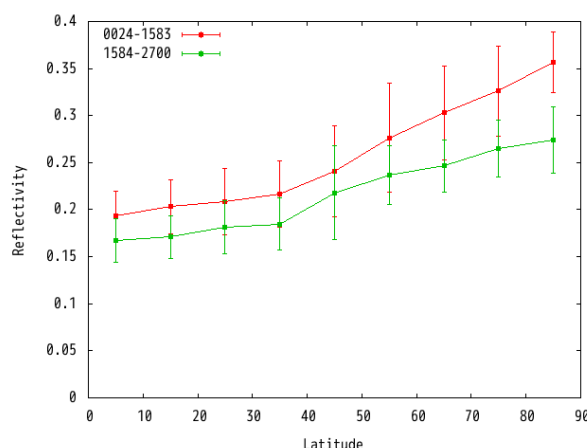


図 4-1: 反射率の緯度依存性.

図 4-2 は図 4-1 でエラーバーに用いた標準偏差の緯度依存性を示した図である。縦軸は標準偏差、横軸は緯度である。1583 周回以前 (赤) と 1584 周回以降 (緑) は時期が異なっており、図 4-2 と同様の期間である。1583 周回以降を見ると、40-50 度の間に極大が見える。標準偏差が大きいということは日によって反射率に大きなばらつきがあるということである。40-50 度の緯度帯は波が活発に活動する緯度であるとされる緯度帯である。波の位相によって反射率が大きく変動すると考えると、この緯度帯に標準偏差の極大が出ることは自然な結果といえる。一方で、1583 周回以前 (赤) は 1584 周回以降 (緑) よりも全体的に変動が大きくなっている。これは 1583 周回以前 (赤) においては反射率が全体的に減少するという長期的な傾向の影響を受けているためと考えられる。また、極大の位置が 1583 周回以前 (赤) よりも高緯度側にずれている。1583 周回以前 (赤) と 1584 周回以降 (緑) では波が活発に活動する緯度帯が移動した可能性がある。

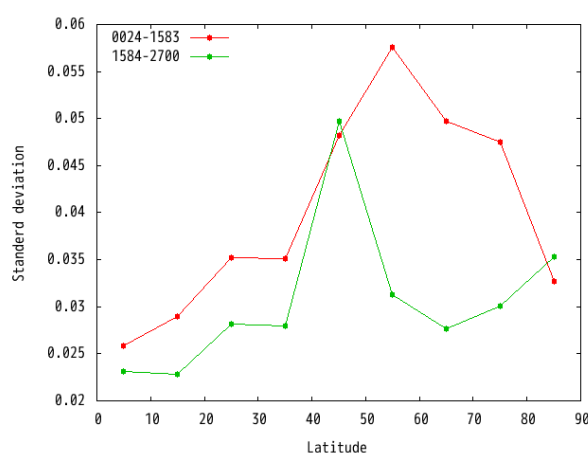


図 4-2: 標準偏差の緯度依存性.

4-2 反射率の日変化

図 4-3 は反射率の日変化を示した図である．縦軸は反射率，横軸は地方時である．地方時は 12 時に太陽は南中し，6 時が日の出，18 時が日没である．緯度は赤道から 10 度ごとの緯度帯で分けている．暖色は赤道に近い緯度帯で，寒色は極に近い緯度帯である．射出方向は天頂から 5 度以内とし，入射角は緯度と地方時を分けているので自動的に決まる．反射率の時間変化があまり見られない 1300 周回-2700 周回の期間のものを抽出し，各緯度帯，各地方時ごとに反射率を平均し，プロットした．

ほとんどの緯度帯において 12 時付近に極大があるようなカーブを描いている．特に南緯 0-30 度の低緯度に見られるカーブが目立っているが，これは雲や吸収物質によるものではなく，天頂方向に反射した光を見ているため，太陽光が天頂に近い方向から入ってきているときには，後方散乱によって反射光が大きくなったからだと考えられる．真上から入ってくる光と斜めから入ってくる光ではたとえ雲が同じであったとしても反射率は異なる可能性がある．太陽光が真上に近い方向から入ってくる 12 時付近と斜めから入ってくる朝と夕方の反射率の違いは，雲そのものの違いではなく，太陽入射角の違いによるものかもしれないということだ．そこで，太陽入射角によらない雲そのものの地方時による変化を見るために，太陽入射角が同じになる午前と午後の時間を組にして午前と午後で違いがあるかどうかについて調べた．

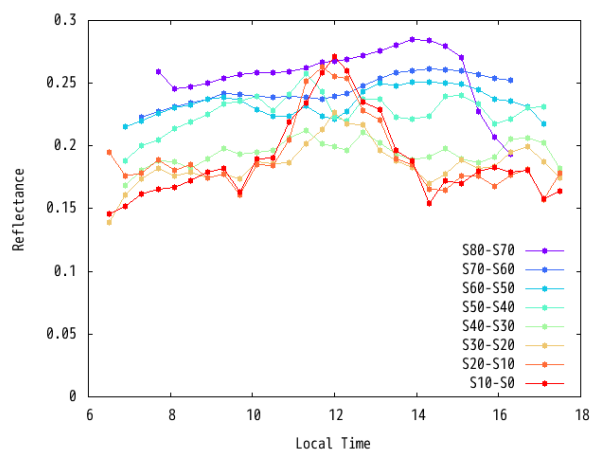


図 4-3: 反射率の日変化.

まず，反射率の日変化を見るために抽出した各ピクセルの地方時から 12 時引き，

絶対値をとった．例えば10時または14時なら2，6時または18時なら6となる．この値が同じであれば，太陽天頂角も同じである．同じ値となる午前と午後の2つの反射率を組にして，午後の反射率から午前の反射率を引いた．

図4-4は反射率の日変化の午前と午後の差を示した図である．縦軸は午後の反射率から午前の反射率を引いたもの，横軸は時間で12時から離れるほど大きい値になる．緯度0-30度の低緯度を見ると，反射率は午前と午後であまり差が無いように見える．一方で，緯度50-80度の高緯度では，午後の反射率の方が午前より大きくなっている．低緯度よりも高緯度で日変化が見られることには違和感を感じる．なぜなら，日変化は朝，夕と真昼の太陽高度に差あるほど強く出ると考えられるからだ．低緯度の方が高緯度よりも南中時の高度は高くなるため，低緯度の方が日変化は強く見えると考えられる．低緯度に日変化が見られない原因はわからない．

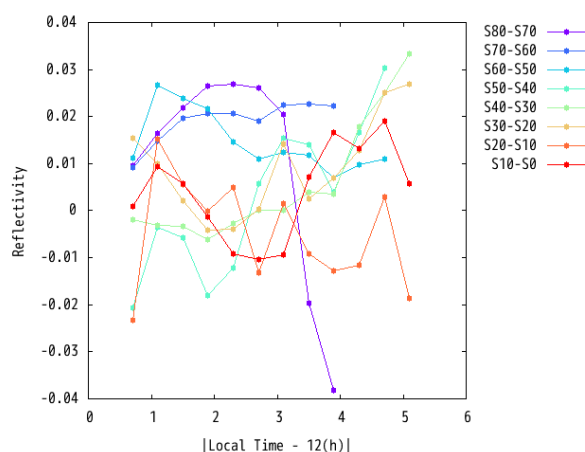


図 4-4: 反射率の午前と午後での変化.

5 まとめ

Venus Express の Venus Monitoring Camera で撮蔵された紫外線画像を使って金星の紫外線反射率の時間・空間変化を解析した.

解析した期間の南半球の中高緯度において, 紫外線反射率の時間変化は 1583 周回あたりまでは時間とともに減少している. これははしもと他 (2011) の結果と同じである. 1584 周回以降は 2700 周回以降を除いてほぼ一定となっている. 2700 周回以降の反射率が大きくなっている現象の原因はわからない.

解析した期間を伸ばしても, 南半球の紫外線反射率の緯度依存性は高緯度ほど大きくなっていることがわかった.

解析した期間の南半球の高緯度において, 地方時の午前より午後の方が大きくなっていることがわかった. 低緯度において, 地方時の午前と午後での紫外線反射率の違いは見えなかった.

謝辞

本研究を行うにあたり,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致します.また,同研究室の皆様も様々な相談に乗っていただきありがとうございました.

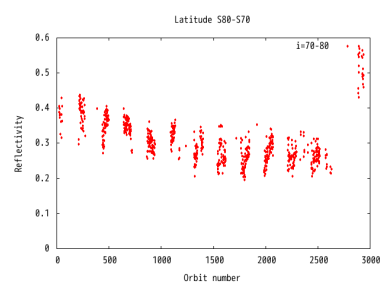
参考文献

- Hashimoto, L. G., et al. 2011: Latitudinal Variation of UV reflectivity of Venus: VEX/VMC Data Analyses. Japan Geoscience Union Meeting 2011, U003-15.
- 弓場, 2010: 金星の紫外線反射率の緯度依存性: 金星探査機が撮像した画像の解析. 岡山大学 理学部 地球科学科 卒業論文 2010.
- 遠藤, 2011: 金星紫外線反射率の時間変化: 金星探査機が撮像した画像の解析. 岡山大学 理学部 地球科学科 卒業論文 2011.
- Imamura, T., 2011: Cloud System of Venus. Earozoru Kenkyu, **22**(2), 95-100.
- Markiewicz, W. J., et al. 2007: Venus Monitoring Camera for Venus Express. Planetary and Space Science, **55**, 12, 1701-1711.
- Svedhem, H., et al. 2009: Venus Express mission. Journal of Geophysical Research: Planets, **114**, E00B33.

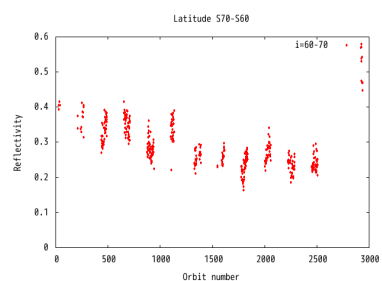
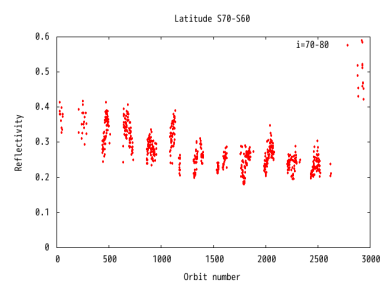
A 図録 1

以下の図は各緯度帯，各入射角の紫外線反射率の時間変化を示す図である。

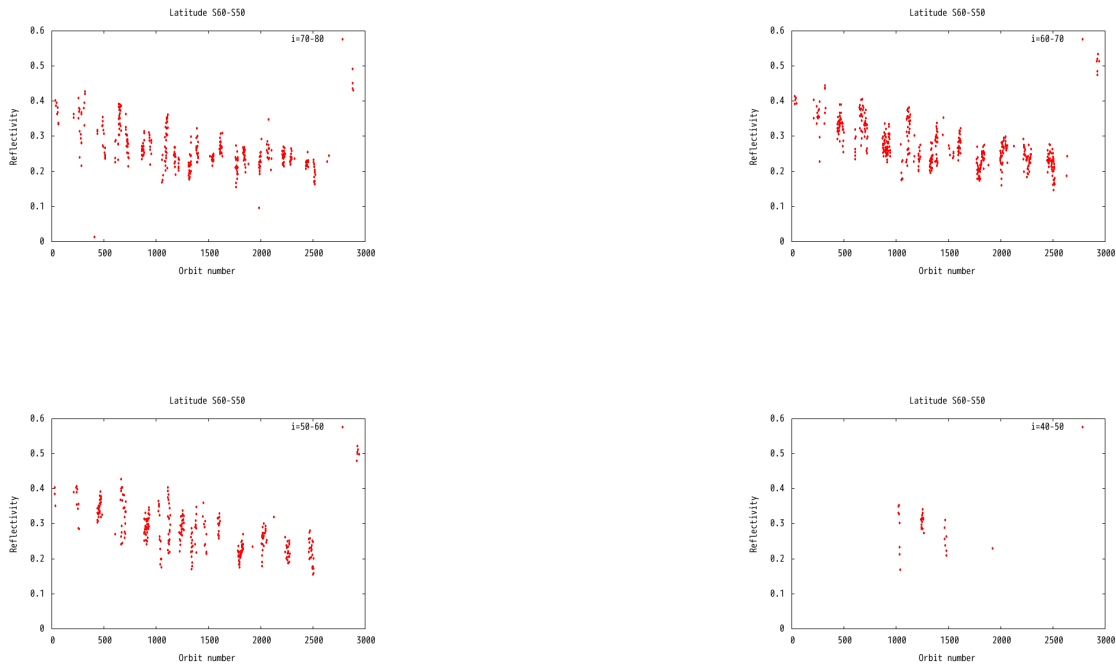
A-1 緯度 S80 度-S70 度



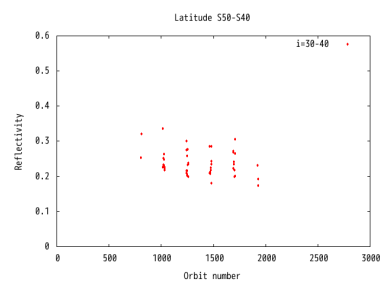
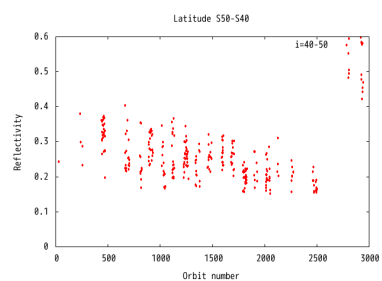
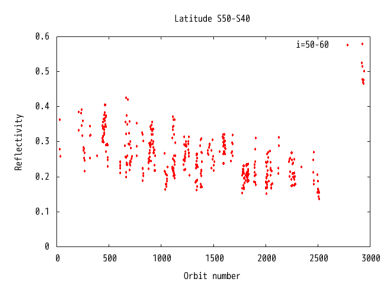
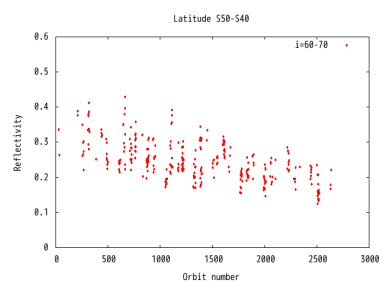
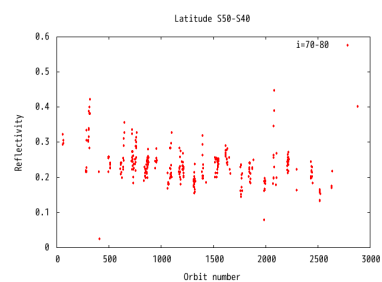
A-2 緯度 S70 度-S60 度



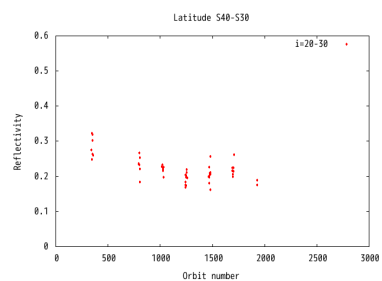
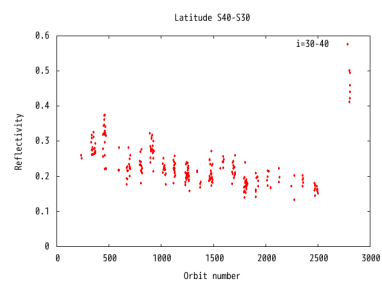
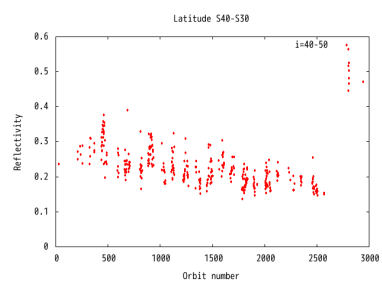
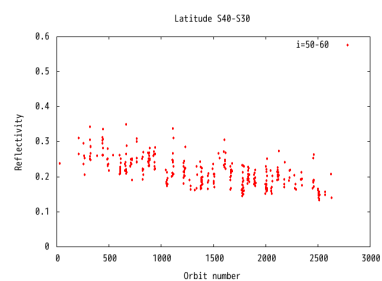
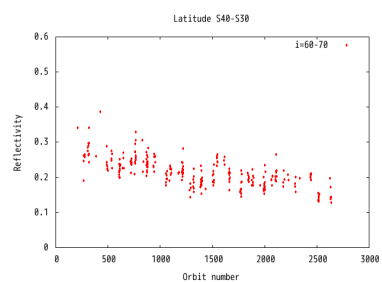
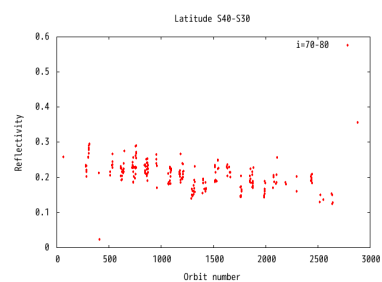
A-3 緯度 S60 度-S50 度



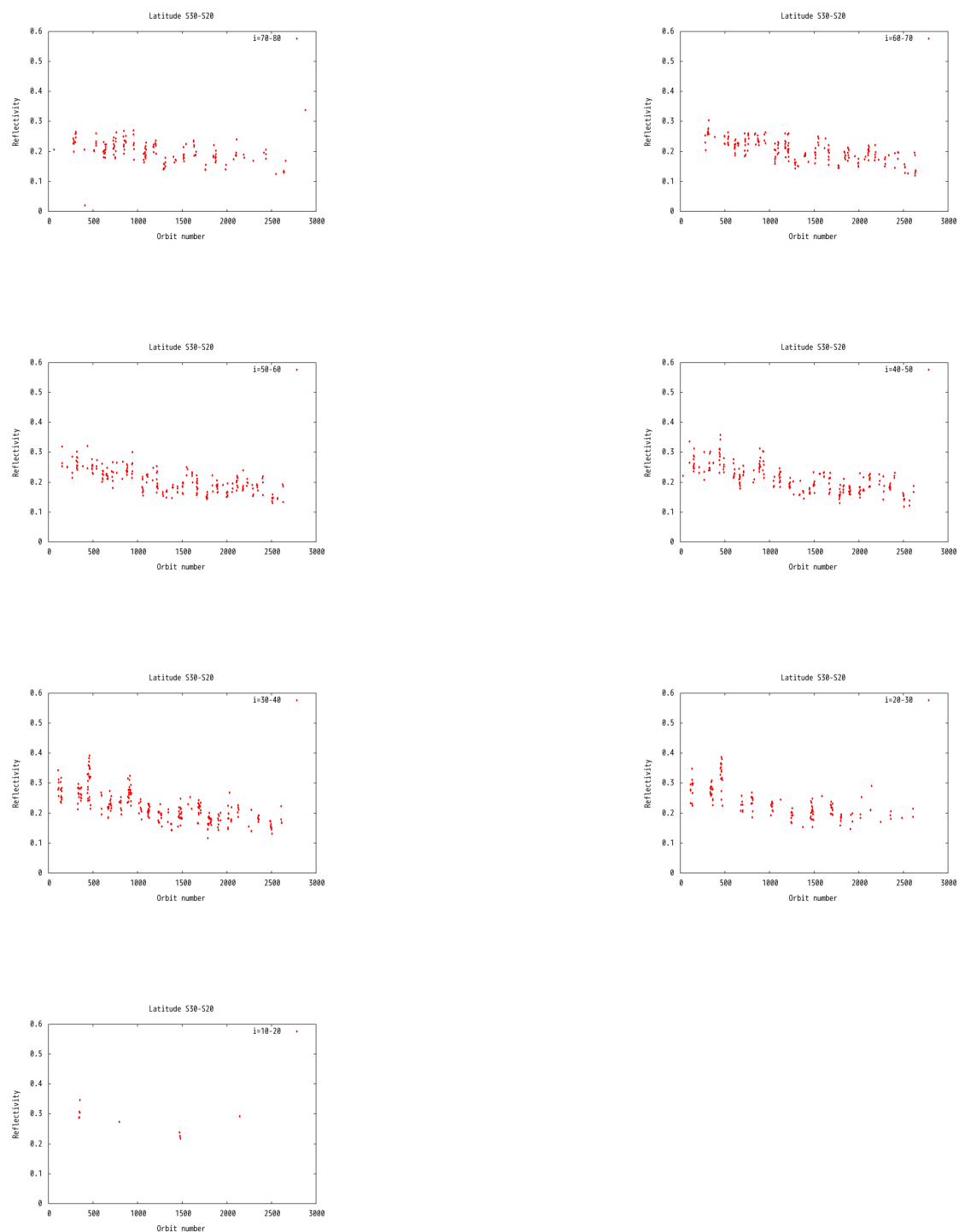
A-4 緯度 S50 度-S40 度



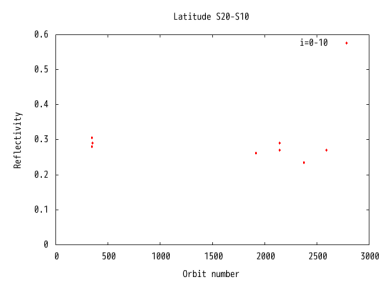
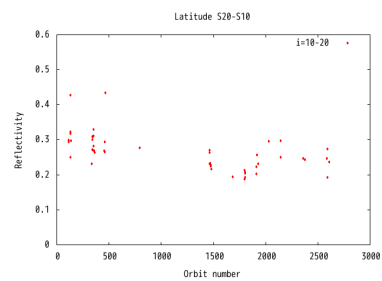
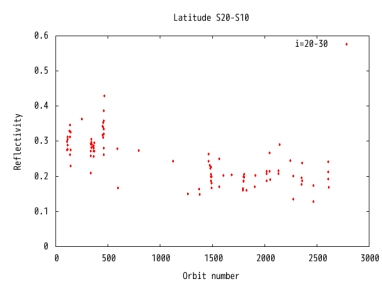
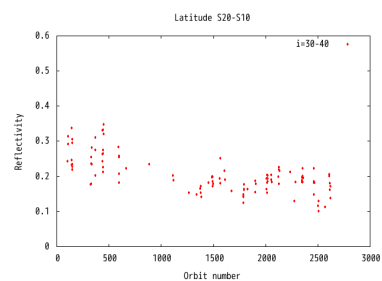
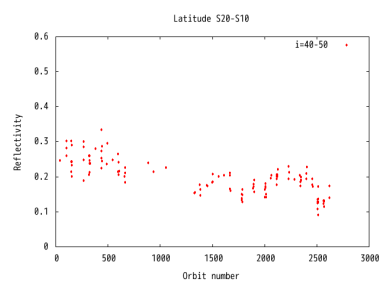
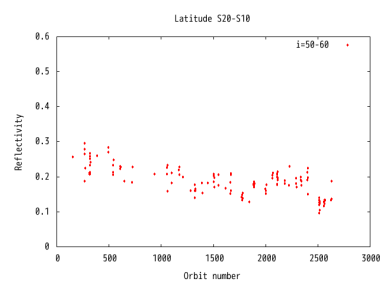
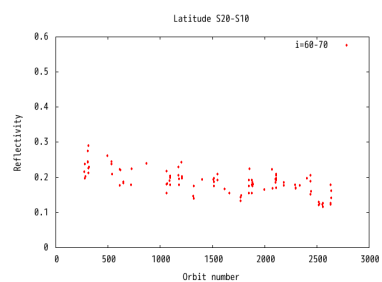
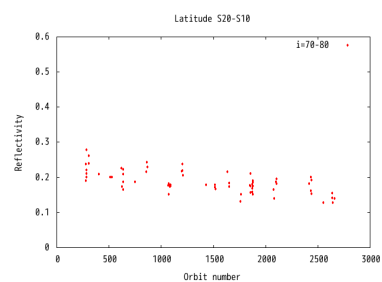
A-5 緯度 S40 度-S30 度



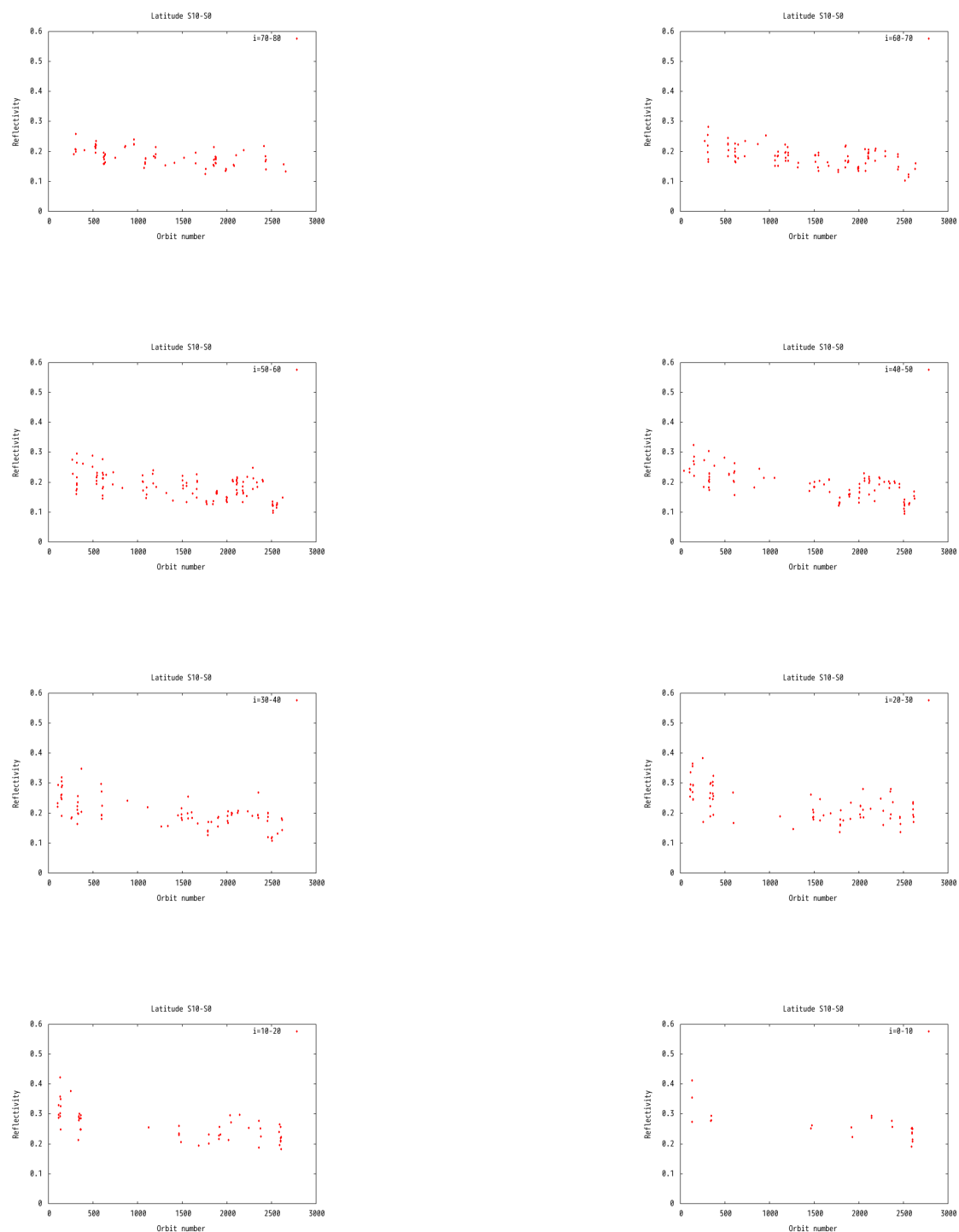
A-6 緯度 S30 度-S20 度



A-7 緯度 S20 度-S10 度



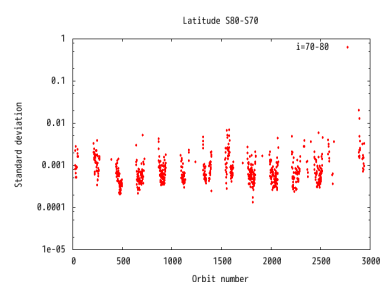
A-8 緯度 S10 度-S0 度



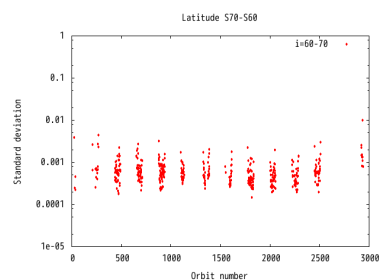
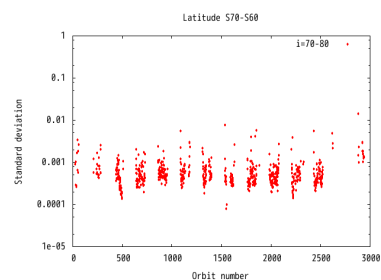
B 図録 2

以下の図は各緯度帯，各入射角の紫外線反射率の標準偏差の時間変化を示す図である。

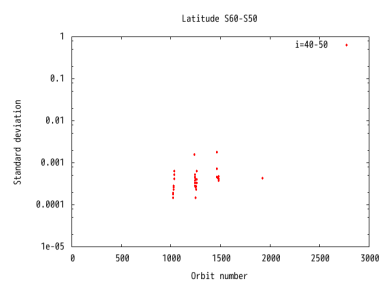
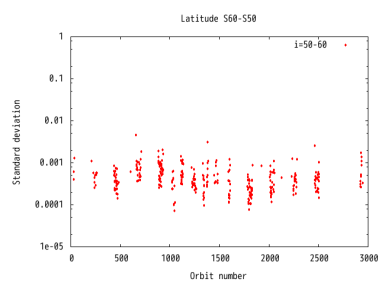
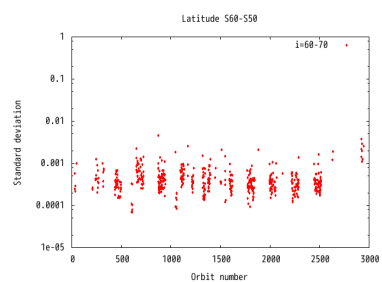
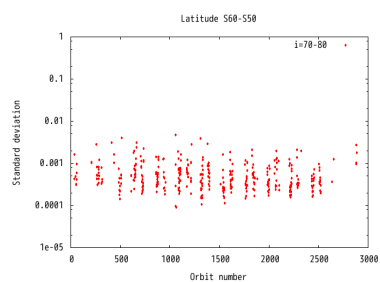
B-1 緯度 S80 度-S70 度



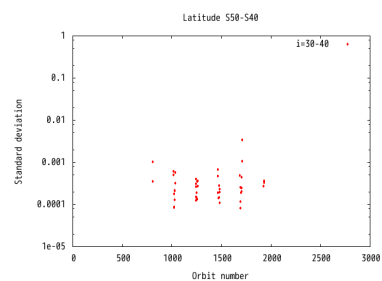
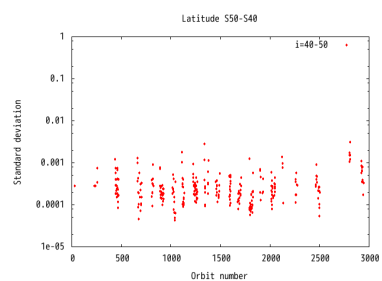
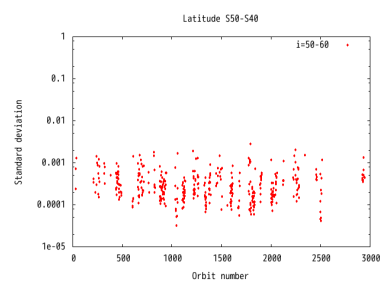
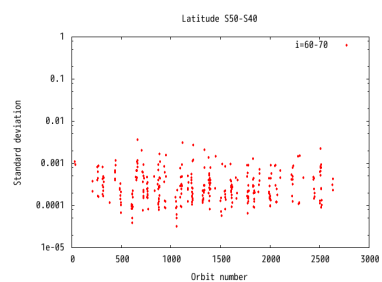
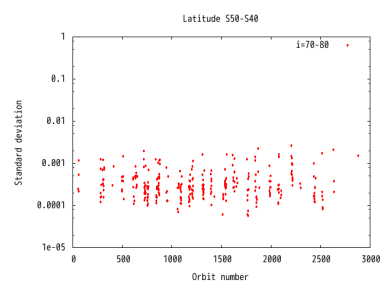
B-2 緯度 S70 度-S60 度



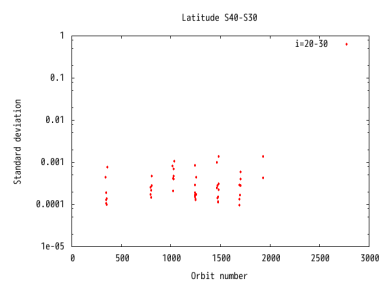
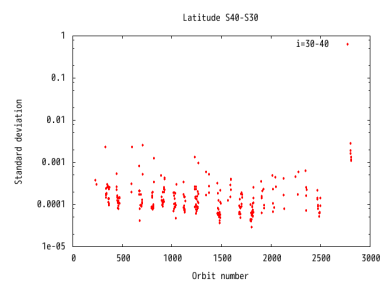
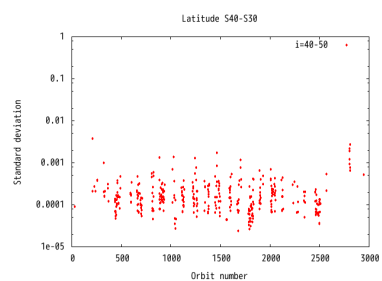
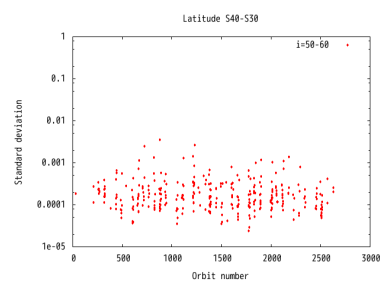
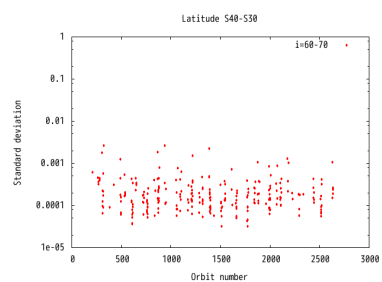
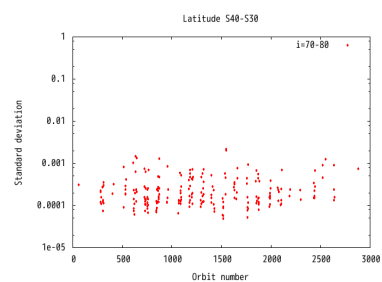
B-3 緯度 S60 度-S50 度



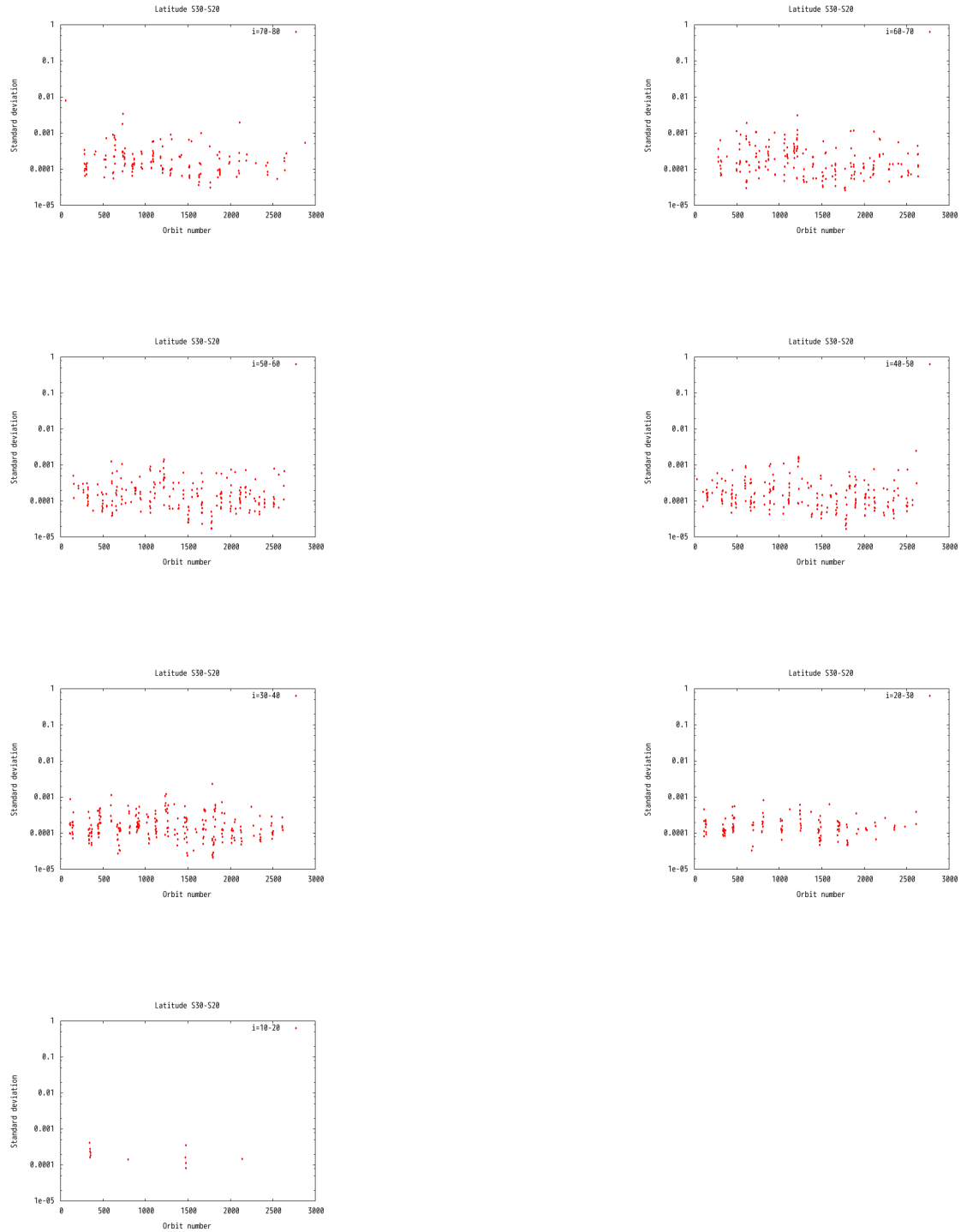
B-4 緯度 S50 度-S40 度



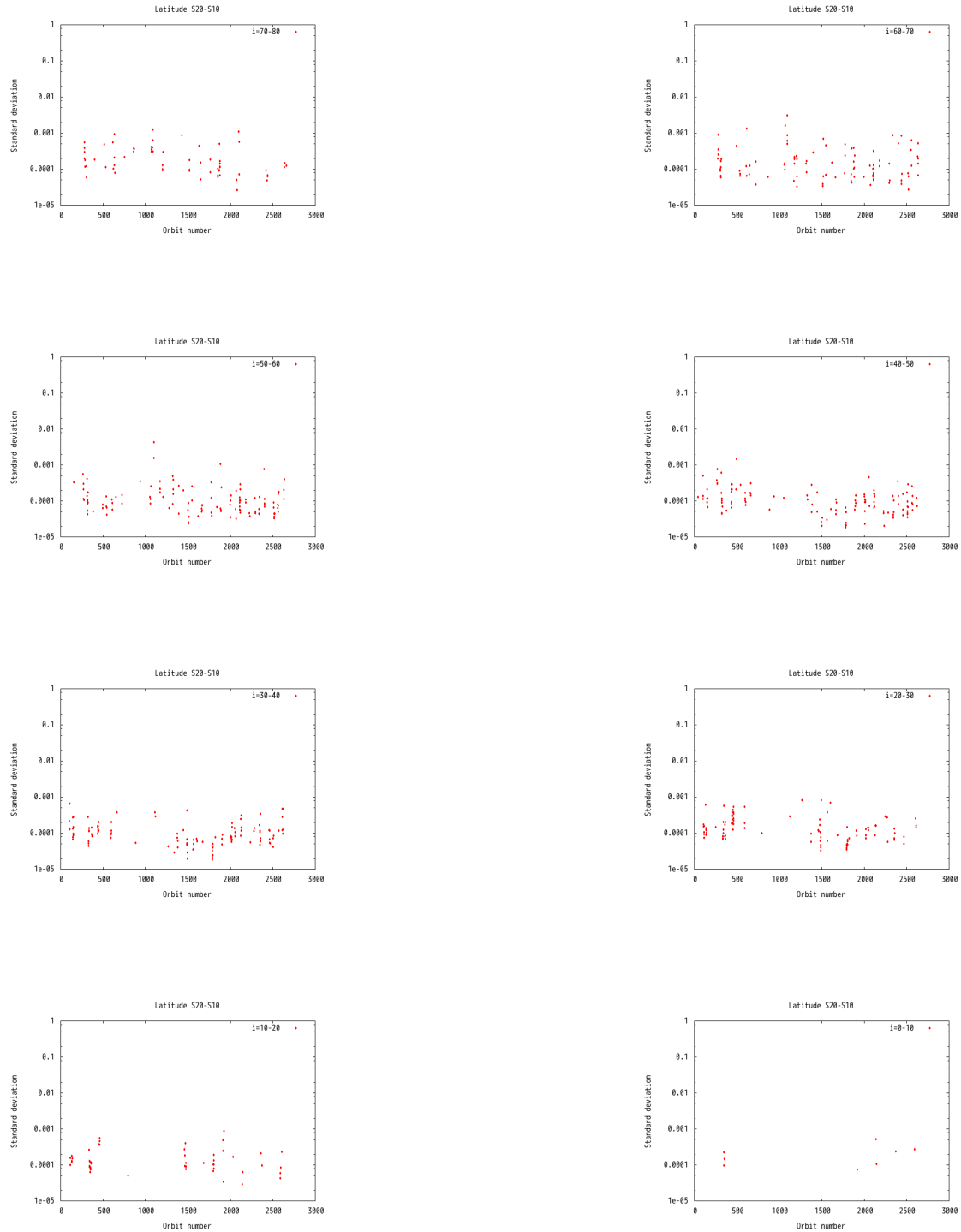
B-5 緯度 S40 度-S30 度



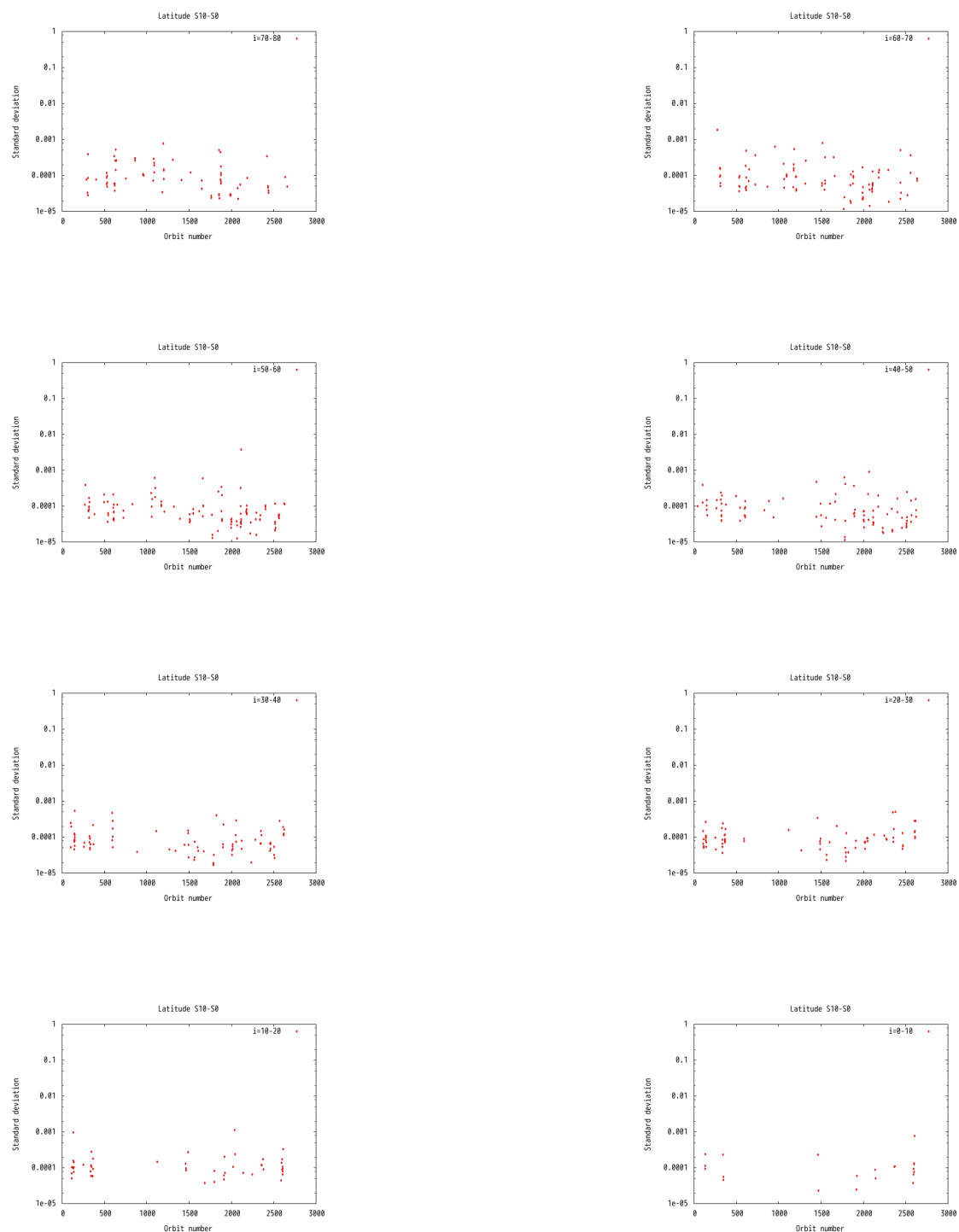
B-6 緯度 S30 度-S20 度



B-7 緯度 S20 度-S10 度



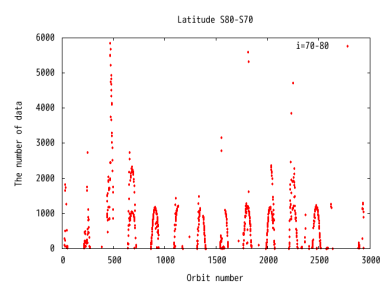
B-8 緯度 S10 度-S0 度



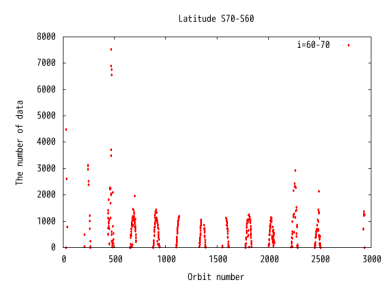
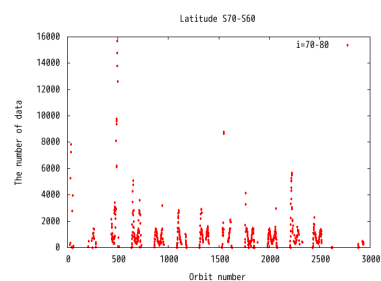
C 図録 3

以下の図は各緯度帯，各入射角のピクセルの数時間変化を示す図である．

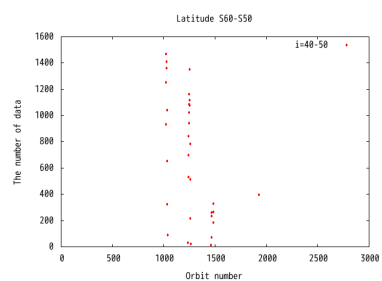
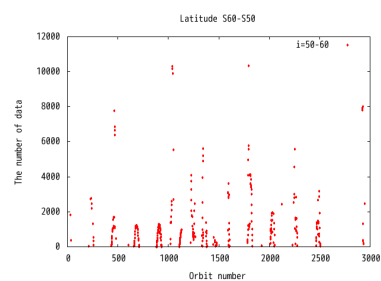
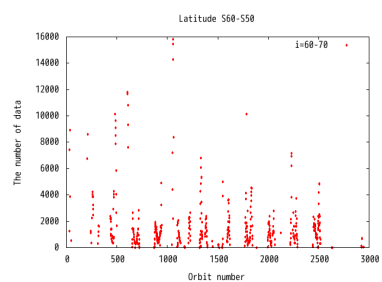
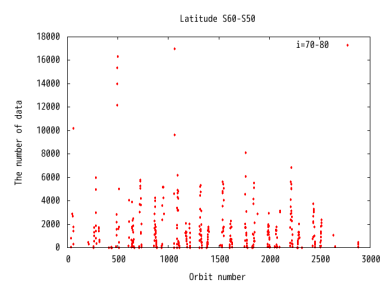
C-1 緯度 S80 度-S70 度



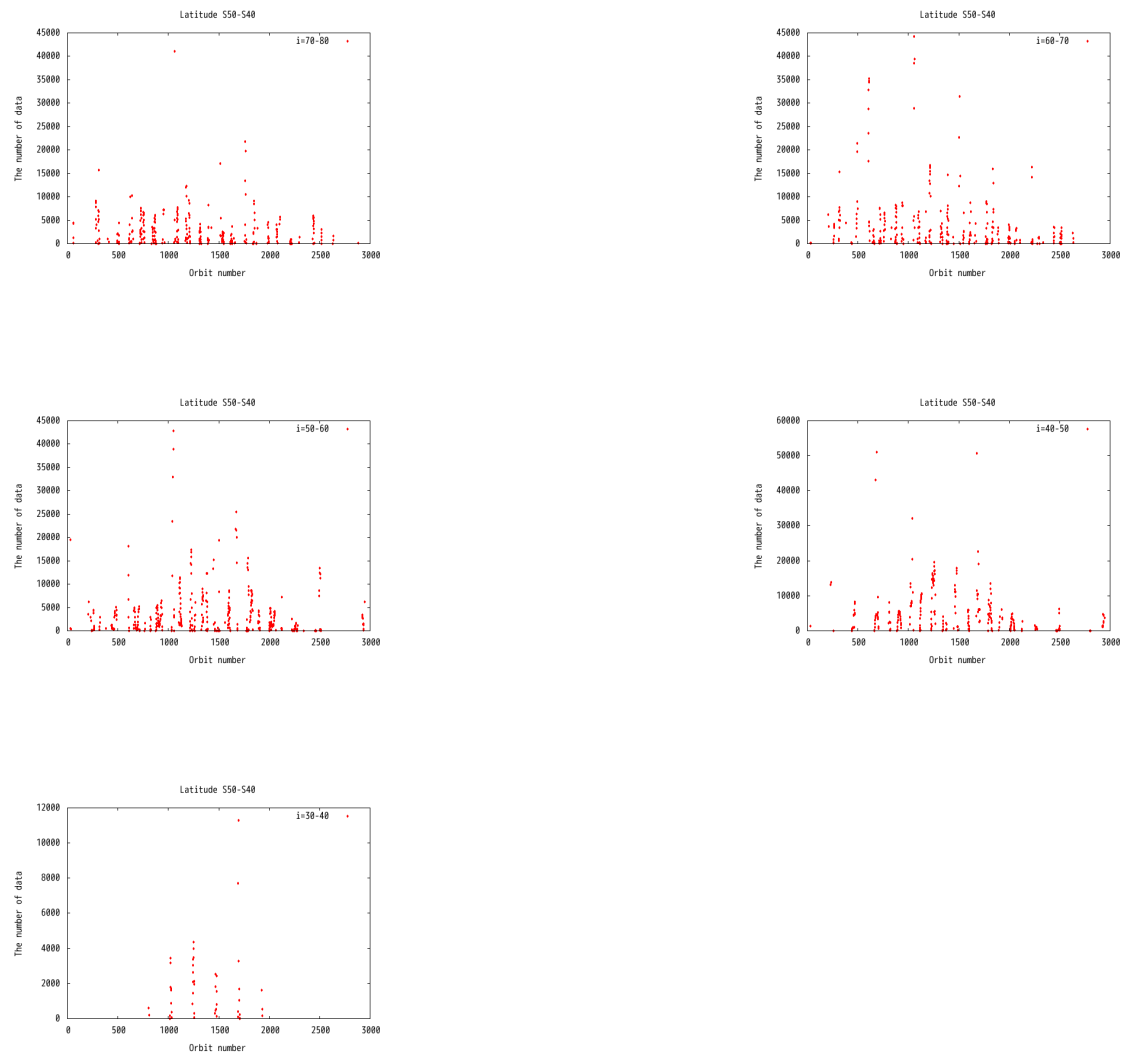
C-2 緯度 S70 度-S60 度



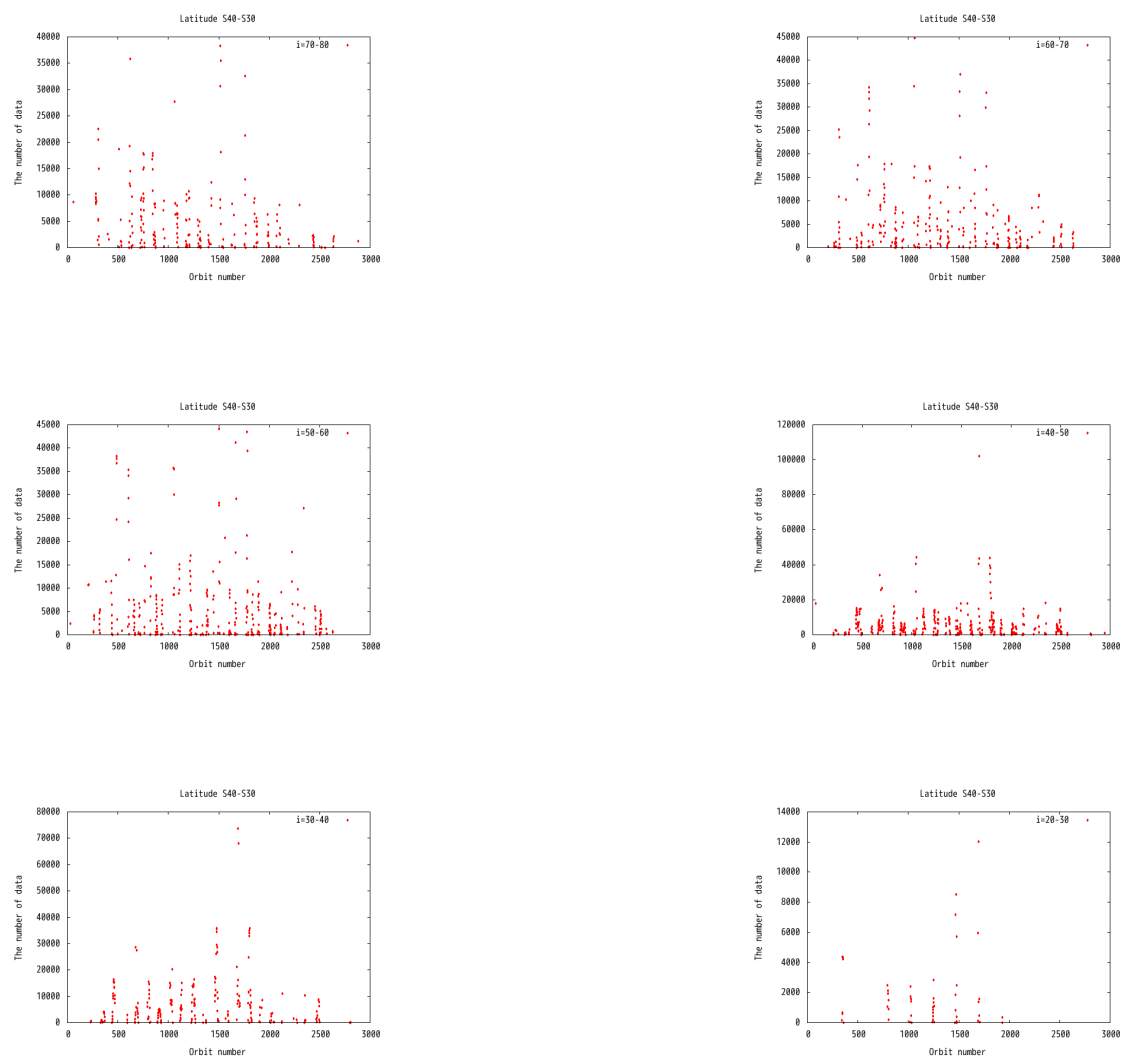
C-3 緯度 S60 度-S50 度



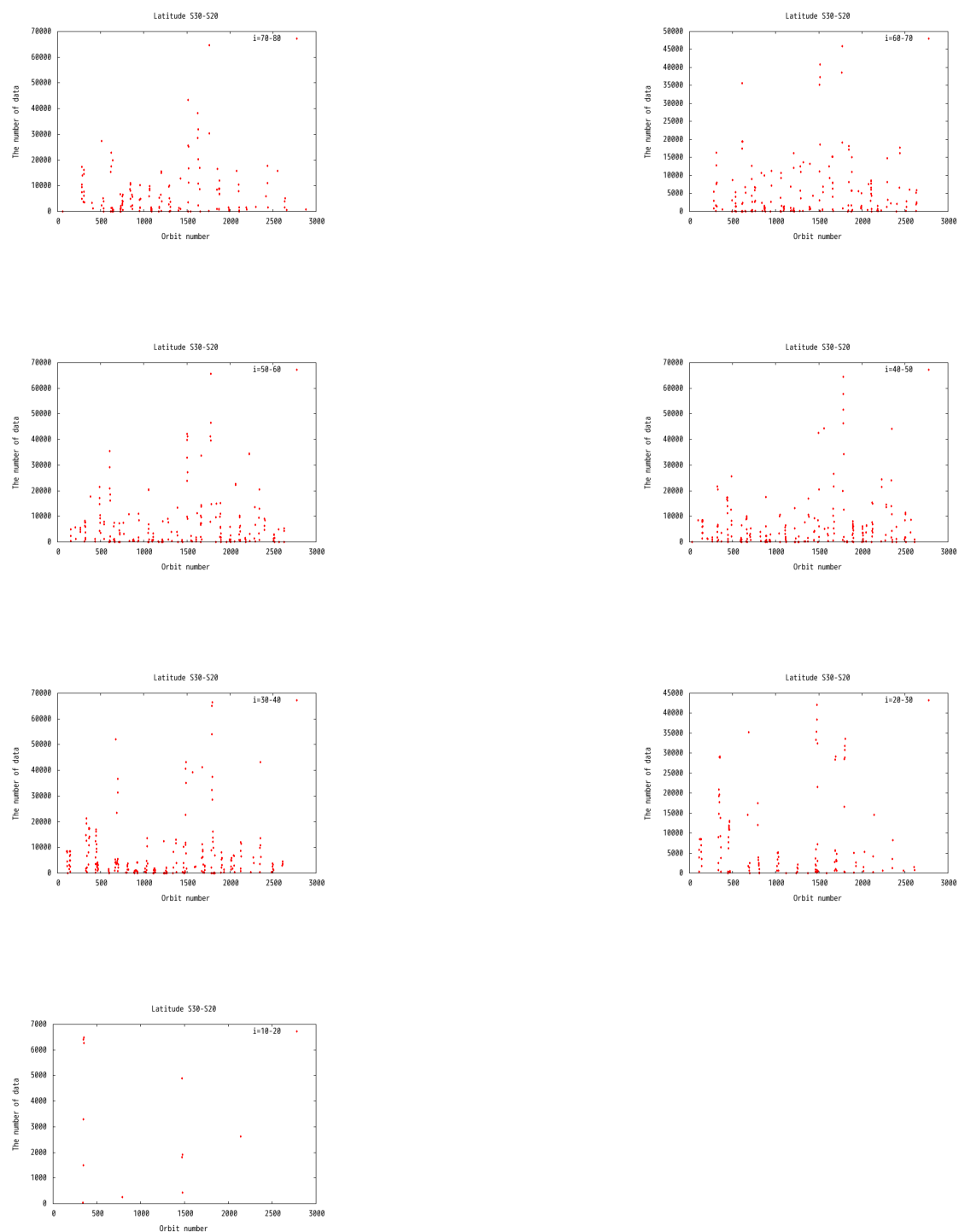
C-4 緯度 S50 度-S40 度



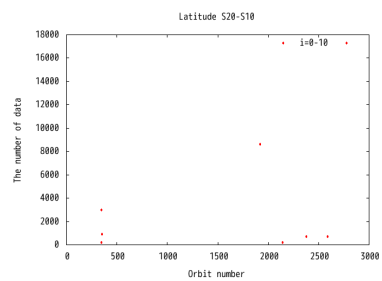
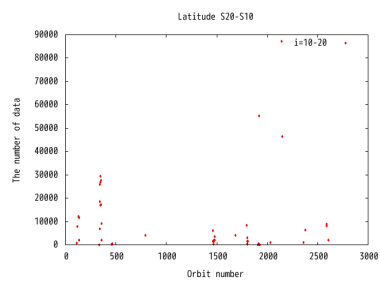
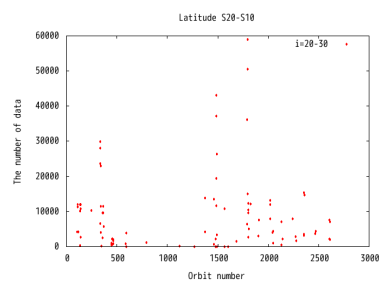
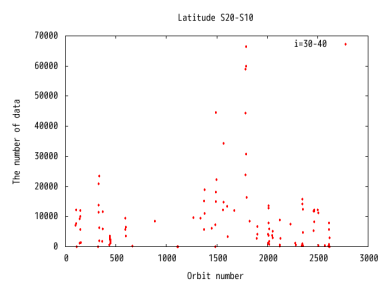
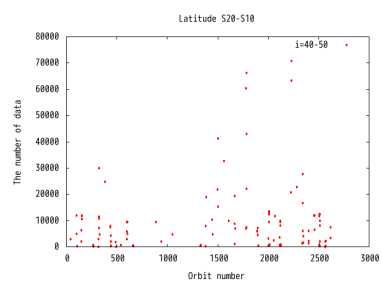
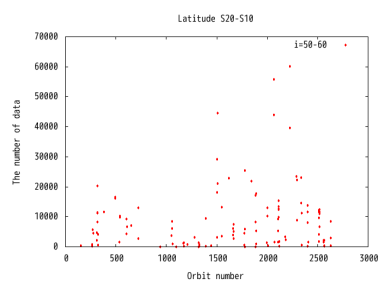
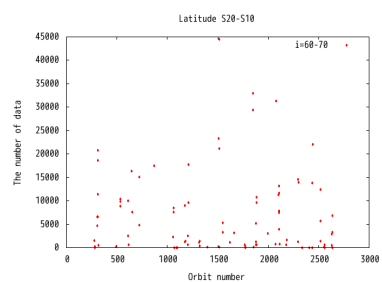
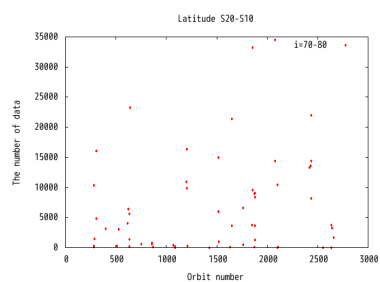
C-5 緯度 S40 度-S30 度



C-6 緯度 S30 度-S20 度



C-7 緯度 S20 度-S10 度



C-8 緯度 S10 度-S0 度

