

東京大学大学院新領域創成科学研究科
複雑理工学専攻

2021 年度

修士論文

金星の微細な雲構造の統計的解析

(Statistical analysis of small-scale clouds of Venus)

2022 年 3 月 1 日 提出
指導教員 今村 剛 教授

須田 智也

要旨

金星は太陽系で地球の 1 つ内側の軌道を回る惑星であり、惑星全体が分厚い雲に覆われている。雲の主成分は硫酸であり、地球の雲の化学組成とは異なっている。金星を全球的に覆う雲の形成過程を理解することは、金星の気象の理解に大きく貢献する。金星の気象や地球などの他の惑星の気象を比較することは、惑星間の気象の体系化を行う上で重要である。

低緯度付近の雲を紫外波長で観察すると、惑星規模の明暗のコントラストが見られる一方で、その中に細胞状の微細な構造が見られる [Titov et al 2012]。今まで惑星規模の雲形態に焦点を当てた研究は多く行われており、4~5 日周期の惑星規模の波動の影響によって明暗が変化するという結果が述べられている一方で、微細な雲構造の水平スケールや、現れる周期性は解明されていない。微細な雲形態と惑星規模の波動との関連性も未だ調べられていない。このような情報は金星大気を覆う雲の形成プロセスの解明につながることを期待できる。

本研究では金星探査機あかつきが撮影した画像を用いて、フラクタル解析や Wavelet 解析を行うことで、まず微細な雲が持つ特徴的なスケールを特定した。フラクタル解析ではフラクタル次元が変化するスケールから、構造の統計的な特徴が変化するスケール、Wavelet 解析では準周期的な構造が卓越するスケールを判断することができる。フラクタル解析と Wavelet 解析の結果、微細な雲構造の複雑さが変化する特徴的なスケールはおおよそ 1000km 程度の大きさであることが判明した。

さらにこれらの解析から得られた空間スケールの値を用いて、そのスケールの構造の時間変化を定量的に評価した。微細な雲形態の構造を画像内の標準偏差の値として定量的に評価し、フーリエ変換や Lomb-Scargle ピリオドグラムという手法を用いることで微細な雲の模様のコントラストがどの程度の周期で変化するかを調べた。フーリエ変換と Lomb-Scargle ピリオドグラムの解析結果より、微細な雲形態は惑星規模の変化と同様に 4~5 日周期で変化することが分かった。このような研究結果から、惑星規模の大気波動と微細な雲形態の形成過程が同期している可能性が示唆される。

目次

1 序論.....	4
2 観測データについて	10
3 Minnaert Law を用いた画像補正	14
4 Wavelet 解析	17
4.1 微細構造のスケールの特定	17
4.2 Wavelet 変換	17
4.3 Wavelet 変換を行う前の処理	20
4.4 結果と考察	23
5 フラクタル解析.....	26
5.1 フラクタル次元と Box counting 法	26
5.2 局所的フラクタル次元	30
5.3 考察	33
6 微細構造の時間変化の周期解析	34
6.1 雲の微細構造の変動性	34
6.2 位相角に依る明るさの補正.....	35
6.3 微細構造の標準偏差と惑星規模輝度の時系列	37
6.4 周期解析	41
7 まとめと考察	65

1 序論

金星は太陽系で地球の 1 つ内側の軌道を回る惑星である。他の太陽系の惑星と比較して、金星と地球は体積や質量が非常に似ている。一方で金星の大気の主成分は CO_2 が 96.5% を占めており、その温室効果の影響により地表付近は約 730 K になっている。さらに、金星は地表全体が硫酸の分厚い雲に覆われており、雲層は高度約 45~70 km である。図 1.1 に金星の温度分布と雲層の高度の模式図を示す。金星は自転速度が約 243 地球日と、地球に比べて遅いが、その大気は高速風が吹いており、雲頂付近の大気は約 4 地球日で金星を一周している [Sánchez-Lavega et al. 2017]。

金星を紫外波長で観察すると惑星スケールの明暗や図 1.2 や 図 1.3 で見られるような細胞上の細かい構造が見える [Belton et al. 1976; Titov et al. 2012; Markiewicz et al. 2007]。主に雲層内の雲頂付近に存在すると考えられている紫外吸収物質は、可視光も吸収をしていると考えられており、金星が太陽光から得るエネルギーの収支に大きく関わっていると考えられる。先行研究 [Lee et al. 2019] では、紫外吸収物質の反射率と雲層の加熱率との関係が計算されている。

SO_2 などの考えられている紫外吸収物質は、光化学反応によって硫酸を生成するため、主に上層の雲形成メカニズムに大きく関与していると考えられている [Titov et al. 2018]。しかし、そのような紫外吸収物質がどのように上層に運ばれるかは解明されていない。紫外吸収物質の分布は、金星大気中の輸送過程を反映していると考えられるため、紫外波長で観測される模様の統計的な解析は金星を全球的に覆う雲の形成プロセスの理解に繋がることが期待できる。さらに雲の形成過程を理解することは、金星の気象を解明する大きな手がかりとなり、地球を含めた惑星の気象の体系化においての重要な糸口になる。

惑星スケールで存在している模様の明暗の変化は、約 4~5 日周期で変動していることが報告されており [Del Genio et al. 1990]、約 4 日周期の変動は、主に赤道域で卓越しているケルビン波、約 5 日周期の変動に関しては、主に中高緯度卓越しているロスビー波と呼ばれる惑星規模の波動に起因すると考えられている [Kouyama et al. 2011; Imai et al. 2019]。図 1.4 に、先行研究による惑星規模の波動のシミュレーション結果を示す。

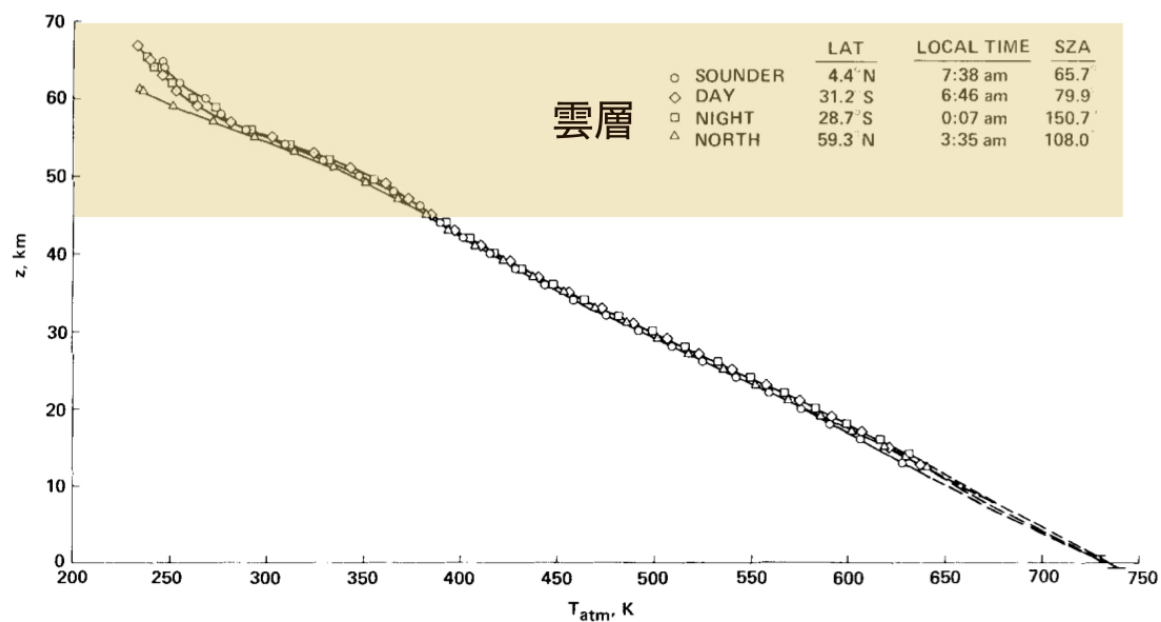


図 1.1：金星探査機のパイオニア・ヴィーナスによる金星の温度分布の観測結果と，雲層の高度の模式図. (Seiff et al. 1985 を改変.)

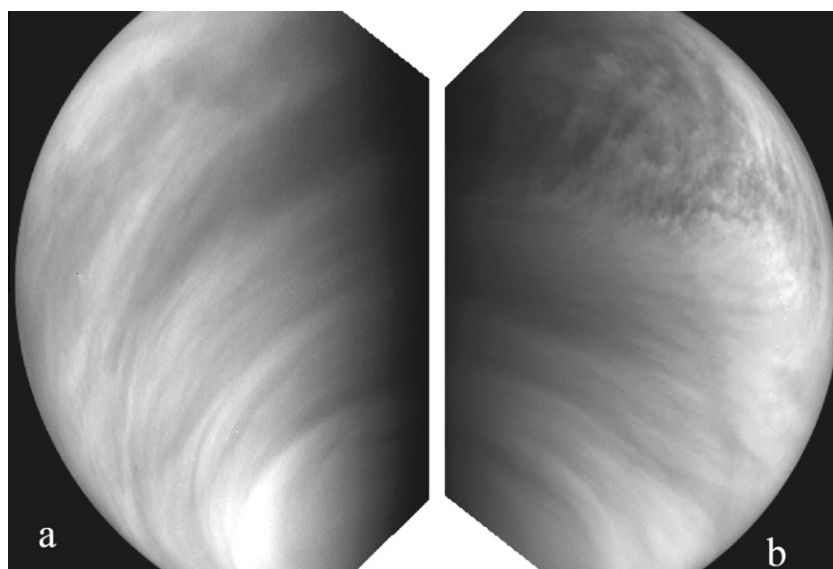


図 1.2：365 nm の波長で観察された金星の画像(Titov et al. 2012). 左図が金星ローカルタイム午前側，右図が午後側を示している.

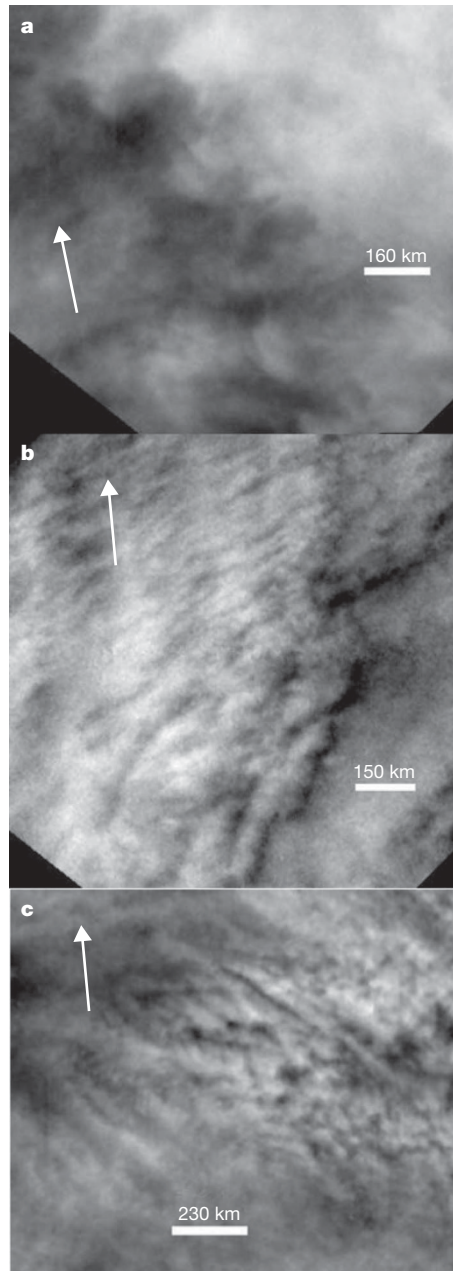


図 1.3 : 365 nm の波長で観察された金星の微細構造(Markiewicz et al. 2007).
図中の矢印は北を示している. (a)では波状の構造が, 対流によってできると考
えられている斑点状の構造に変化している. (b)では筋状の構造が見えており,
(c)では小さな対流セルが見られる.

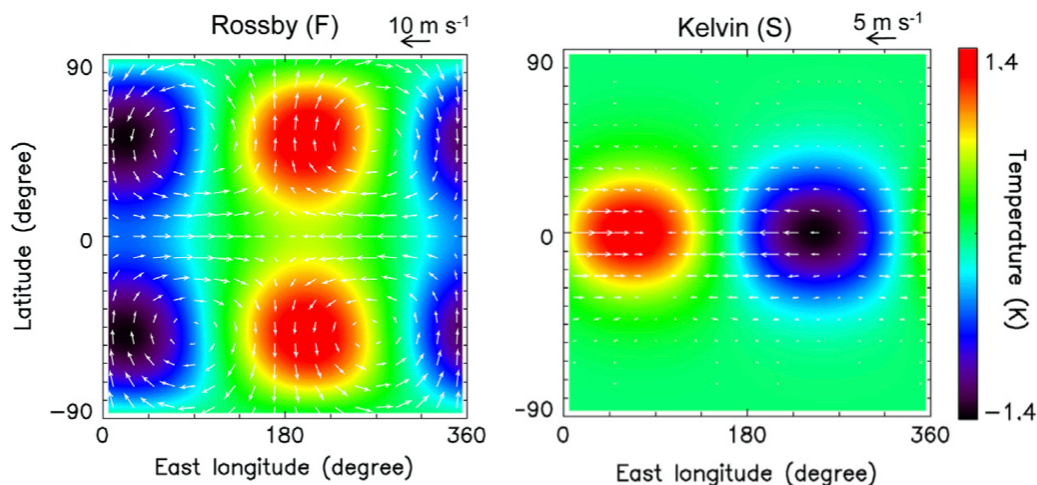


図 1.4：惑星規模の波動のシミュレーション(Kouyama et al. 2015). カラーバーは温度の変化を表しており、ベクトルは風速場を示している. 左図は主に中高緯度で、約 5 日周期で卓越すると考えられているロスビー波, そして右図は主に赤道域で、約 4 日周期で卓越するとされているケルビン波がモデルにより現れている.

金星の、太陽直下を通る経度を正午、太陽の真反対を通る経度を 0 時とし、0 時から朝、昼、夕方と経度 15° につき 1 時間進むように時刻を割り振ったものをローカルタイムとする. 細かい構造に関しては、図 1.2 に見られるように、ローカルタイム午前側よりも午後側の方がよく見られるという先行研究がある [Titov et al. 2012]. この細かい構造が生じる理由の 1 つとして、対流によって作られると考えられており、対流セルの大きさは $200\sim 700$ km [Rossow et al. 1980] や約 20 km [Markiewicz et al. 2007] である、といった研究もなされている. このような惑星規模の波動と対流構造の相互作用は、地球上の赤道域でも観測例がある. 図 1.5 に、東向きに伝播しているケルビン波と共に、対流活動による降水域が東向きに移動している観測例と、そのシミュレーションを示す [Weber et al. 2021].

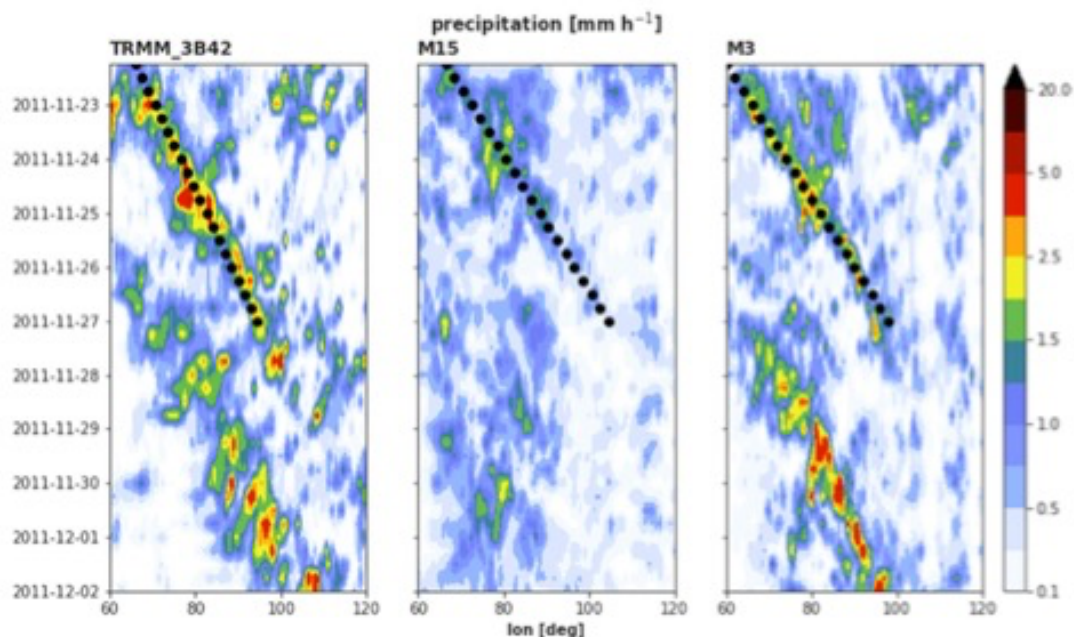


図 1.5：地球の赤道域(北緯 5°~南緯 5°)における, 2011 年 11 月 22 日からの降水量の変化のプロット (Weber et al. 2021). 左図は TRMM 衛星による観測であり, 右側 2 つの図はシミュレーション結果となっている. 横軸は経度, 縦軸は時間を表しており, 黒い点は 2011 年 11 月 27 日までの合計降水量が最大の地点の軌跡を示している. 約 4 日周期で卓越するケルビン波と, その中に存在している対流によって生じる細かい構造が見てとれる.

しかし, 金星の惑星規模の雲構造の中に存在している微細構造は未だに要因が特定されていない. 対流セルから為る可能性があると考えられている微細構造の水平スケールの定量的な評価や構造が現れる周期性, 金星ローカルタイムによる構造の現れ方の違い, といったものさえ調べられていない.

雲構造に卓越する力学的なプロセスが, どのスケールで変化するかを特定することができれば, そのスケールで雲の形成過程にも変化が生じると考えられる. また, 微細構造が現れる時間的な周期性があることが分かれば, 惑星規模の明暗の周期との関連性を調べることができる. その結果から, 惑星規模の明暗を作り出していると考えられている惑星規模の波動と, その中で現れる構造との連動が調べられる. つまり, 微細構造の周期性の同定も雲層内の対流の生成の理解につながる. したがって, 微細構造の水平スケールの特定や, 周期性の有無を調べることは, 金星大気を解明する上で大きな手がかりとなることが期待できる.

そこで本研究ではこのような微細な構造に着目をし、雲の構造が変化する特徴的なスケールの評価、そして周期性の解析を行った。まず、第2章で解析に使用した画像の情報を述べる。第3章では、解析に使用する画像に用いた画像補正を紹介し、第4章、第5章で Wavelet 変換とフラクタル解析という2つの手法を用いて雲の構造が変化する特徴的なスケールの評価を行った結果を述べる。そして第6章では、それらの解析で得られた特徴的な空間スケールの値を参考に微細な構造を取り出し、模様を画像の標準偏差と結び付けることで周期性を調べた。周期については惑星規模の模様の明暗とも比較し、惑星スケールの物理との関連性も考察した。

2 観測データについて

金星探査機あかつきは 2015 年 12 月に金星の周回軌道に投入され、現在も観測を続けている。軌道周期は約 10.5 日であり、最近点高度は約 1000 km、最遠点高度は約 36 万 km である[Nakamura et al. 2016]。あかつきには波長の異なる様々なカメラを搭載しており、カメラで金星を連続的に撮影することによって異なる高度や物質の分布を観測する。本研究では主に UVI というカメラ[Yamazaki et al. 2018]が撮影した紫外波長の画像を解析に用いた。また、IR2 というカメラ[Satoh et al. 2017]が撮影した $2.02\text{ }\mu\text{m}$ 赤外画像も解析の一部に使用した。画像の一例を図 2.1 と 2.2 に示す。解析では、JAXA の「あかつき」紫外イメージャデータアーカイブ(<https://darts.isas.jaxa.jp/planet/project/akatsuki/uvi.html.ja>)と $2\text{ }\mu\text{m}$ カメラデータアーカイブ(<https://darts.isas.jaxa.jp/planet/project/akatsuki/ir2.html.ja>)で提供されている、撮影された画像を金星での緯度経度座標系に展開した Level3 データという画像を使用した。これらの画像は撮影された元画像の解像度を損なわないように展開されている。高度約 70 km の赤道上での緯度経度 1° は約 106.8 km であり、以降の解析ではこの値を用いる。

UVI では 283 nm と 365 nm の 2 つの紫外波長で金星大気を撮影している。2 種類の紫外画像の撮影時刻は数分の時差があるものの、ほぼ同時刻に撮影されている。283 nm 画像では高度 65 km 付近の SO_2 の水平分布を観測することができる。365 nm では S_8 や S_3 , Cl_2 , S_2O などの物質が吸収物質の候補に挙げられているが、正確には未だ同定されていない[Esposito et al. 1997; Mills et al. 2007]。一方で 283 nm 画像と 365 nm 画像では強い正の相関が現れている。これらの吸収物質の量が多い部分は画像では暗く見える。

また、IR2 により $2.02\text{ }\mu\text{m}$ で撮影された画像を用いた。 $2.02\text{ }\mu\text{m}$ という波長では、熱放射の影響よりも、太陽散乱光が金星大気中の CO_2 による吸収の影響を強く受けるために、 CO_2 による吸収を観測することができる。そのため、この波長の画像から雲層より上に存在している CO_2 の量を観測することができる。雲頂高度が高い部分は CO_2 の量が少なくなるため明るく映る。 $2.02\text{ }\mu\text{m}$ 画像はそのまま見るとあまり明暗の変化は見られないが、ハイパス処理などを行うことで図 2.3 に見られるような細かい構造が見える[Sato et al. 2020]。

第 4 章の Wavelet 解析と第 5 章のフラクタル解析では、283 nm 画像と $2.02\text{ }\mu\text{m}$ 画像を用いる。283 nm 画像で観測できる SO_2 の混合比は、雲頂以下で増えるため、鉛直流に敏感に応答することが期待される。また、 $2.02\text{ }\mu\text{m}$ 画像で観測できる雲頂高度も鉛直流に依って変動すると思われる。また、IR2 は軌道投入直後の観測データしかないため、第 6 章での周期解析では長期的にデータが取得

されている 283 nm, 365 nm 画像を用いる. 365 nm 画像で観測される吸収物質は, 紫外から可視光領域まで吸収すると考えられており, 太陽光のエネルギーは可視光帯に極大を持つため, 太陽光の吸収を介して惑星スケールの波動と小規模な模様の相互作用に関わることが期待される.

紫外画像や 2.02 μm 画像から観察できる輝度値と吸収物質の関係を図 2.4 に表す. また, UVI, IR2 の視野角は $12^\circ \times 12^\circ$ であり, 画像のピクセル数は 1024×1024 である. 画像の解像度は金星とあかつきの距離によって変化するが, 1 ピクセル当たり約 13.0~78.3 km である. S/N 比は, UVI が 100 以上, IR2 が約 320[Satoh et al. 2016]となっている.

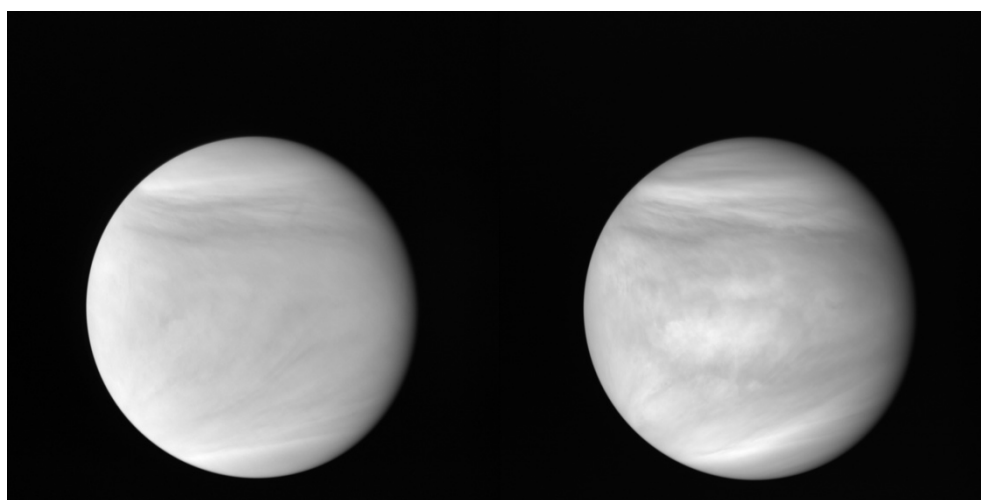


図 2.1 : UVI が撮影した紫外画像の一例. 左図が 283 nm, 右図が 365 nm の波長で観察された画像. 2016 年 4 月 25 日 17 時撮影.

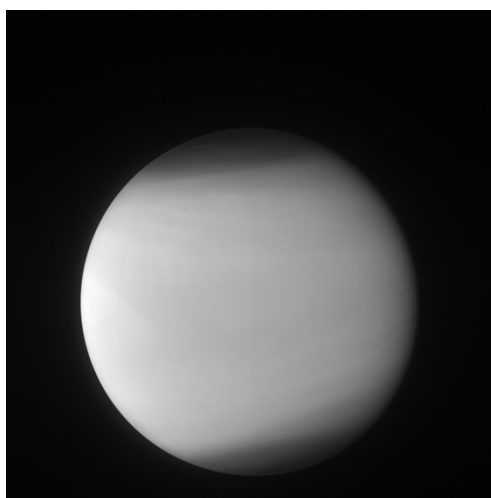
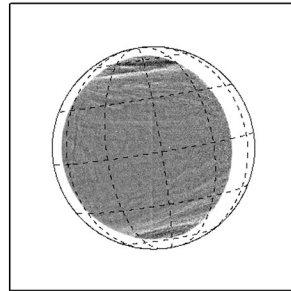
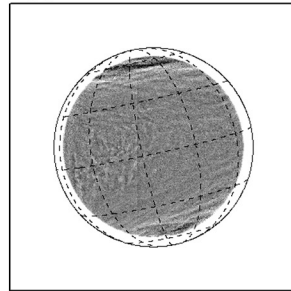


図 2.2 : 2.02 μm 赤外画像の一例. 2016 年 4 月 25 日 17 時撮影.

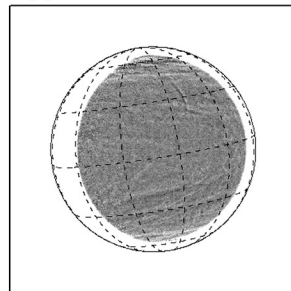
IR2: 2.02 μm
 (a) 2016-04-25 17:08:21



(b) 2016-05-06 16:08:23



(c) 2016-05-17 18:08:23



(d) 2016-05-18 09:08:24

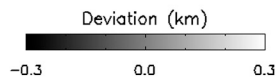
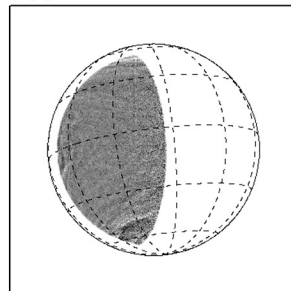


図 2.3 : ハイパス処理を行うことで細かい構造を取り出した 2.02 μm 画像 (Sato et al. 2020). 画像の濃淡は高度の偏差(km)を表している.
 (b)などでは, 図 2.2 の画像ではあまり見られない細かい構造が赤道域に見られる.

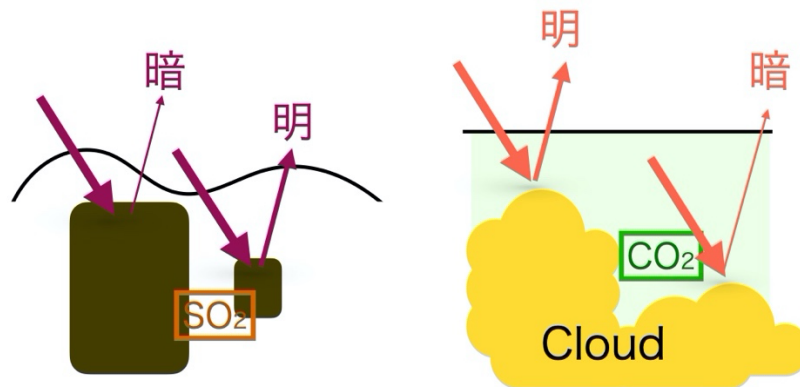


図 2.4：画像から観察できる輝度値と，吸収物質の関係を表した図. 283 nm 紫外画像では主に SO_2 を観測できる. SO_2 が多い部分では光が多く吸収されるため，画像では暗く映る. $2.02 \mu\text{m}$ 赤外画像では雲頂より上にある CO_2 の量を観測できる. 雲頂高度が高いほど画像では明るく映る.

3 Minnaert Law を用いた画像補正

あかつきによって撮影される画像の輝度値には、金星大気に含まれている吸収物質の影響の他に、図 3.1 に示すような、太陽光の入射角や出射角、散乱位相角の影響が含まれている。本研究では大気に含まれている吸収物質や雲頂高度の分布に注目をするため、後者の影響を、経験則を用いて軽減する。ここでは惑星画像の処理によく使われている、Minnaert Law と呼ばれている光学補正を用いた[Lee et al. 2015].

輝度 $R(\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}/\text{sr})$ は位相角 α ，入射角 i ，出射角 e に依存している。ここで輝度 R を、角度に依存していない R' とディスク関数 D に分けて

$$R(\mu_0, \mu, \alpha) = R' \times D(\mu_0, \mu, \alpha) \quad (3.1)$$

という形で書き換える。ここで、 $\mu_0 = \cos(i)$ ， $\mu = \cos(e)$ である。

Minnaert Law では

$$D = \mu_0^{k(\alpha)} \mu^{k(\alpha)-1} \quad (3.2)$$

という関数を用いる。ここで $k(\alpha)$ は位相角に依る変数である。位相角は同一画像上では変化が小さいため、定数とみなすことができる。したがって k の値も同一画像内で定数とみなすことができる。

式(3.1), (3.2)より、

$$\ln(R\mu) = k \ln(\mu\mu_0) + \ln(R') \quad (3.3)$$

と式変形できるため、この定数 k は、1枚の画像の全画素の輝度値を縦軸に $\ln(R\mu)$ ，横軸に $\ln(\mu\mu_0)$ をとってプロットした散布図に線形フィッティングを行った直線の傾きから推定される。この補正により、補正後の輝度値 R' は

$$R' = R \frac{\mu}{(\mu\mu_0)^k} \quad (3.4)$$

と表される。この画像補正を行うことにより、太陽光の入射角，出射角による影響をある程度取り除いたデータで解析を行うことができる。

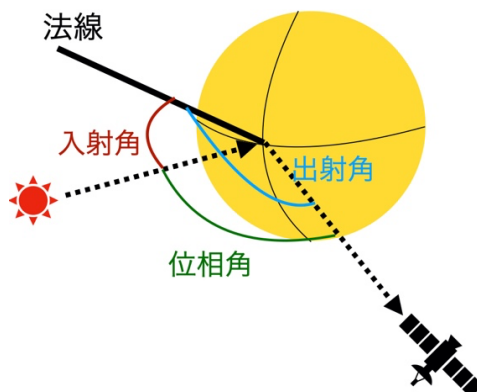


図 3.1：太陽と金星，あかつきと，それらがなす角度の関係の模式図.

実際に Minnaert Law を用いて画像補正を行った一例を図 3.2, 3.3 に示す.

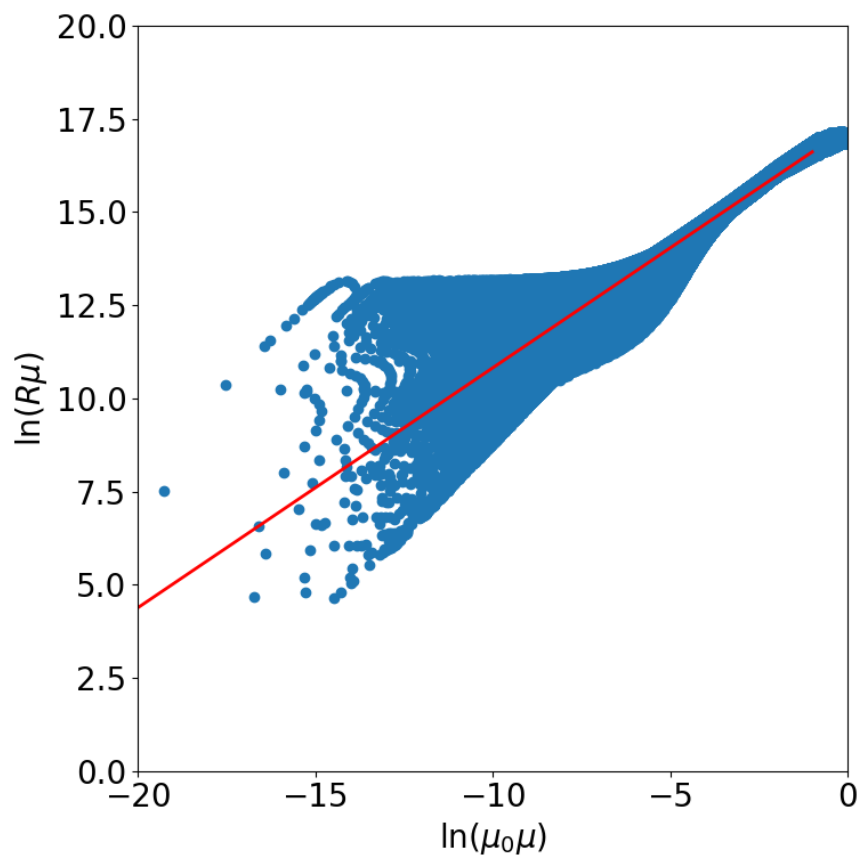


図 3.2：Minnaert Law の係数 k を求めるためのプロット，回帰直線を行ったものの傾きが k の値となる．（2018 年 11 月 16 日 7 時撮影データを使用.）

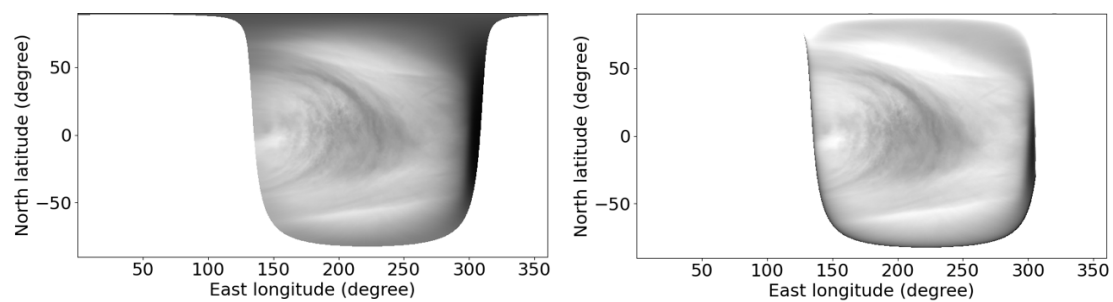


図 3.3 : Minneart Law を用いて画像補正を行った結果. 左図が補正前, 右図が補正後である. (2018 年 11 月 16 日 7 時撮影データを使用.)

4 Wavelet 解析

4.1 微細構造のスケールの特定

金星大気を紫外波長で観察した場合に，惑星規模の明暗と，その中に存在する微細な構造が見られることは先行研究でも知られている．しかし，微細な構造から大規模な構造へと遷移する特徴的なスケールを定量的に評価した研究は未だなされていない．そのようなスケールが特定できれば，金星全球を覆っている雲の形態を作る，力学的なプロセスが変化するスケールの特定に繋がることを期待できる．そのような特徴的な大きさを特定することは，雲形成のメカニズムの解明の糸口になることが考えられる．

したがってこの章ではまず，Wavelet 解析という手法を用いることで，準周期的な波動が卓越するスケールを定量的に評価することを試みる．

4.2 Wavelet 変換

Wavelet 変換では，フーリエ変換では取り出せない局所的な振動構造を検出することができることがメリットである．計算プログラムは Torrence and Compo [1998] を参考にした Python のモジュール PyCWT

(<https://pycwt.readthedocs.io/en/latest/>)を使用した．

まず，wavelet 変換の式を示す．

$$w(a, b) = \int \frac{1}{\sqrt{a}} x(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (4.1)$$

ここで， $x(t)$ は解析する 1 次元データであり， a が波長， b が時間(空間)軸に対応している．また， ψ は mother wavelet と呼ばれる関数であり， $\bar{\psi}$ は ψ の複素共役を表す．mother wavelet に関しては様々な関数が存在するが，本研究では，汎用性が高い Morlet 関数というものを使用した．Morlet 関数は三角関数とガウス関数を掛け合わせたような形になっており，以下の式で表される：

$$\psi(\eta) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} e^{-\frac{\eta^2}{2}} e^{i\omega_0\eta} \quad (\omega_0 = 6) \quad (4.2)$$

Morlet 関数の概形を図 4.1 に示す.

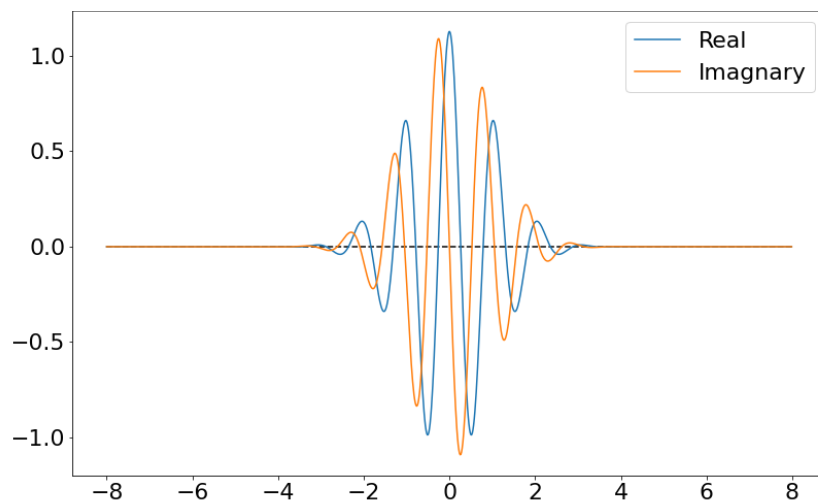


図 4.1 : Morlet 関数のグラフ. 青線が実部, オレンジ線が虚部を表している.

図 4.2 に Wavelet 変換の一例を示す. 結果から, フーリエ変換では取り出せない局在的な振動を検出できることが読み取れる.

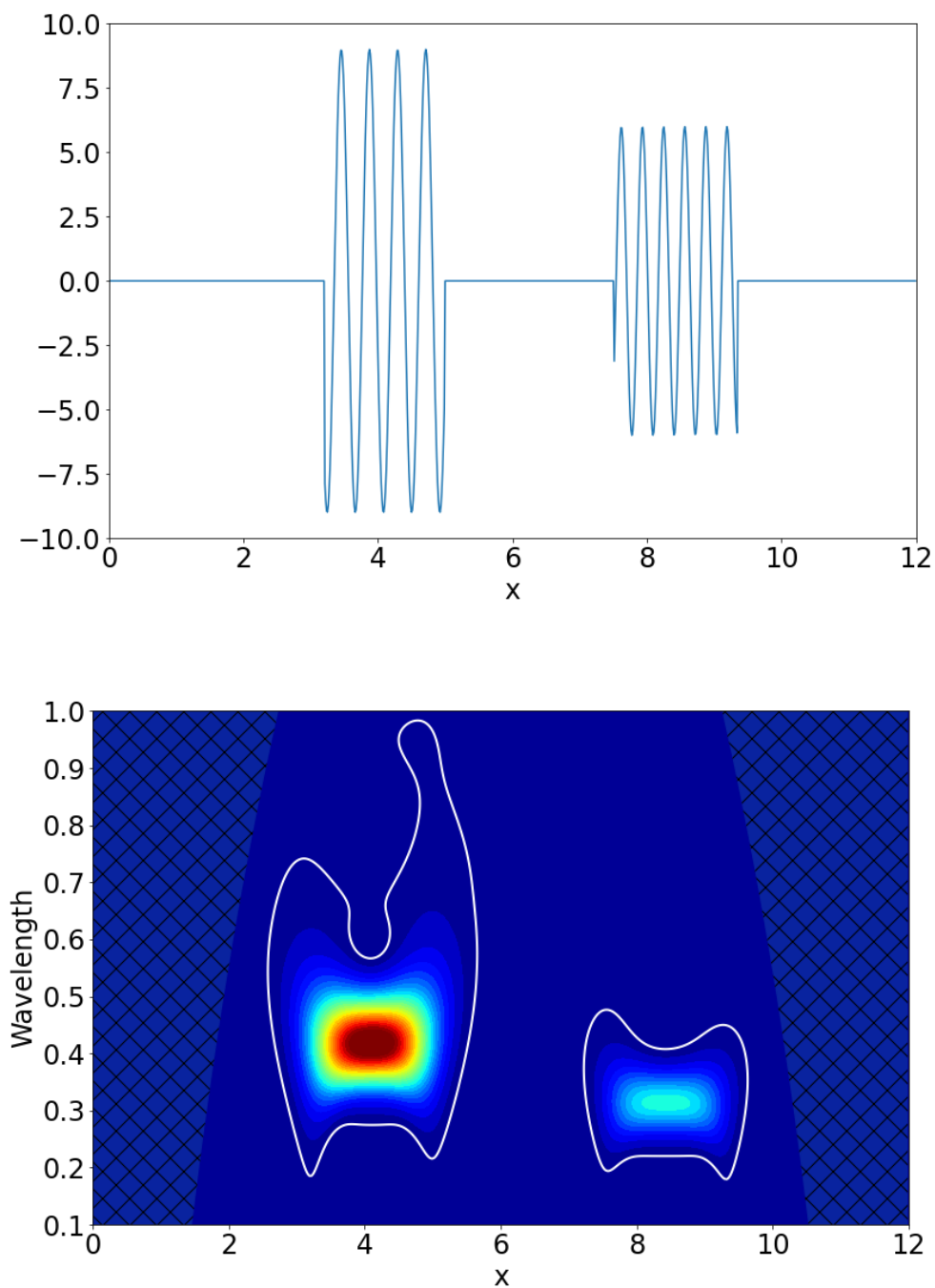


図 4.2 : 1 次元信号(上図)を Wavelet 解析した例(下図). 解析結果でハッチが掛かっている部分は, データ端の影響で信頼性が落ちる部分(cone of influence)を表す. また, 白線はあるピークに対しての信頼区間 95% の範囲を表している.

4.3 Wavelet 変換を行う前の処理

Wavelet 変換による解析については，金星大気の赤道に沿った東西方向の微細構造に注目をした．

今回は，Minnaert Law によって画像補正を行った波長 283 nm の画像と波長 2.02 μm 画像の赤道上の輝度値を，ローカルタイム正午の経度を中心に東西方向に $\pm 45^\circ$ の範囲で抽出して解析に用いた．解析に用いた画像の例を図 4.3 に示す．また，使用したデータの撮影された時刻の一覧を以下の表 4.1 に示す．

283 nm 紫外画像	2.02 μm 赤外画像
2016 年 4 月 25 日 13 時	2016 年 4 月 25 日 13 時
2016 年 4 月 25 日 15 時	2016 年 4 月 25 日 15 時
2016 年 4 月 25 日 17 時	2016 年 4 月 25 日 17 時
2016 年 5 月 6 日 10 時	2016 年 5 月 6 日 10 時
2016 年 5 月 6 日 12 時	2016 年 5 月 6 日 12 時
2016 年 5 月 6 日 14 時	2016 年 5 月 6 日 14 時
	2016 年 5 月 6 日 16 時
2016 年 5 月 17 日 14 時	2016 年 5 月 17 日 14 時
2016 年 5 月 17 日 16 時	2016 年 5 月 17 日 16 時

表 4.1：Wavelet 解析に使用したデータの撮影時刻一覧．位相角が約 30° 未満かつ，あかつきと金星との距離が約 10 万 km のデータを選択した．

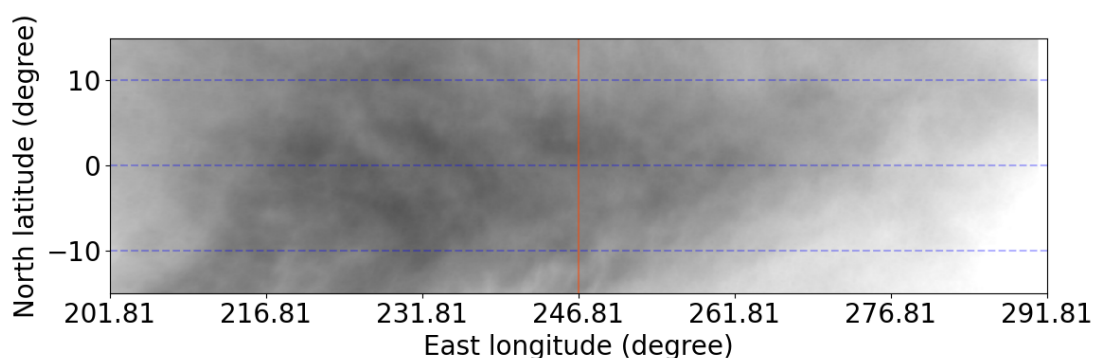


図 4.3：Minnaert Law による補正をかけ，低緯度付近のみ切り取った 283 nm 紫外画像．(2016 年 5 月 6 日 10 時撮影.)

また、切り取った 1 次元データには、惑星スケールの波動の影響が多分に含まれており、微細な構造が惑星規模の明暗の変化に埋もれて観測できない可能性が生じる．そこで本研究では、切り取った 1 次元データを 6 次多項式で fitting を行い、元データから fitting したデータを差し引くことによって大きな波長のトレンド除去を行い、その残差を解析した．解析に用いたデータと、その Wavelet 変換の結果の一例を図 4.4~図 4.6 に示す．結果のプロットでは、ハッチ (cone of influence) の内側かつ信頼区間 95% の黒線内のピークに注目をする．

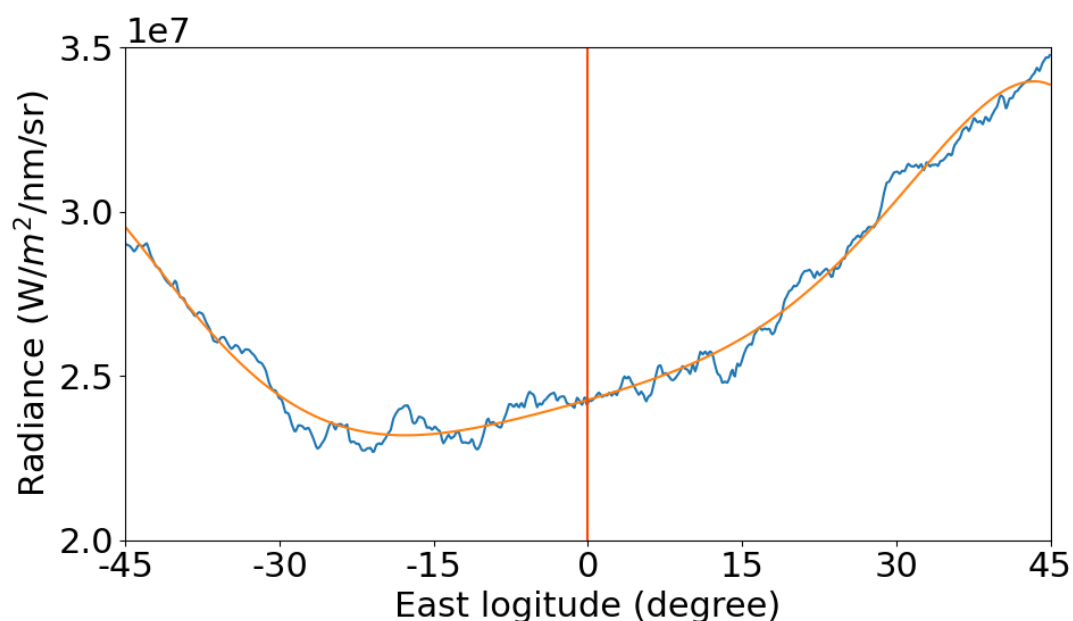


図 4.4 : 2016 年 5 月 6 日 10 時撮影の 283 nm 画像に Minnaert Law 補正を行い、赤道のデータのみを取り出した 1 次元データ(青線)．そのデータを 6 次多項式で fitting した線がオレンジ色で示されている．横軸は正午のローカルタイムを 0°を基準とした経度を示している．

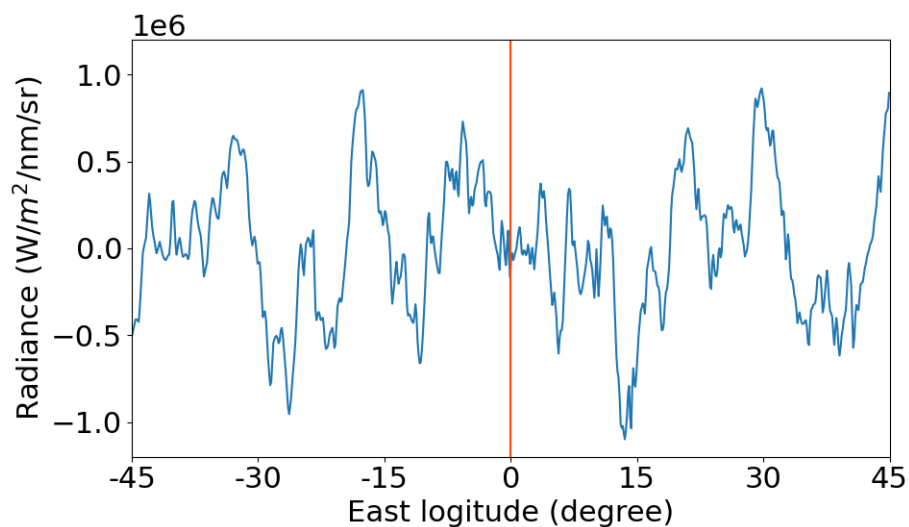


図 4.5：切り取った赤道の 1 次元データから多項式 fitting したデータを差し引いたデータ。トレンド除去する前のデータと比較すると，大規模な変動が取り除かれているのがわかる。

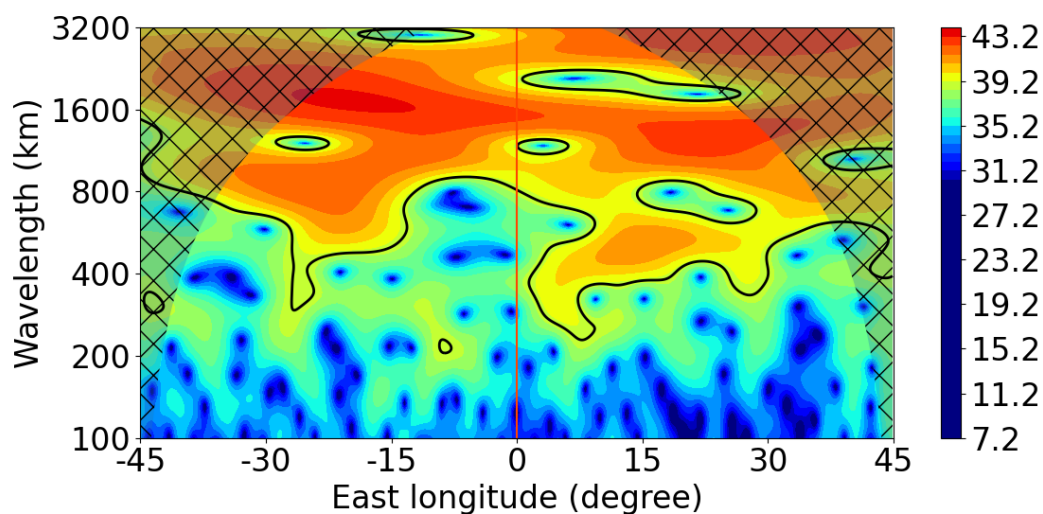


図 4.6：トレンド除去を行った図 4.5 のデータに Wavelet 変換を行なった結果のプロット。ハッチの部分は cone of influence, 黒い等高線は，あるピークに対する信頼区間 95%の範囲を示している。横軸はローカルタイム正午の経度を 0° とした場合の経度，縦軸は波長(km)を表している。このプロットから，どの時間帯にどのような波長の成分が卓越しているかを観察することができる。

4.4 結果と考察

図 4.7 と図 4.8 に Wavelet 変換の結果を示す.

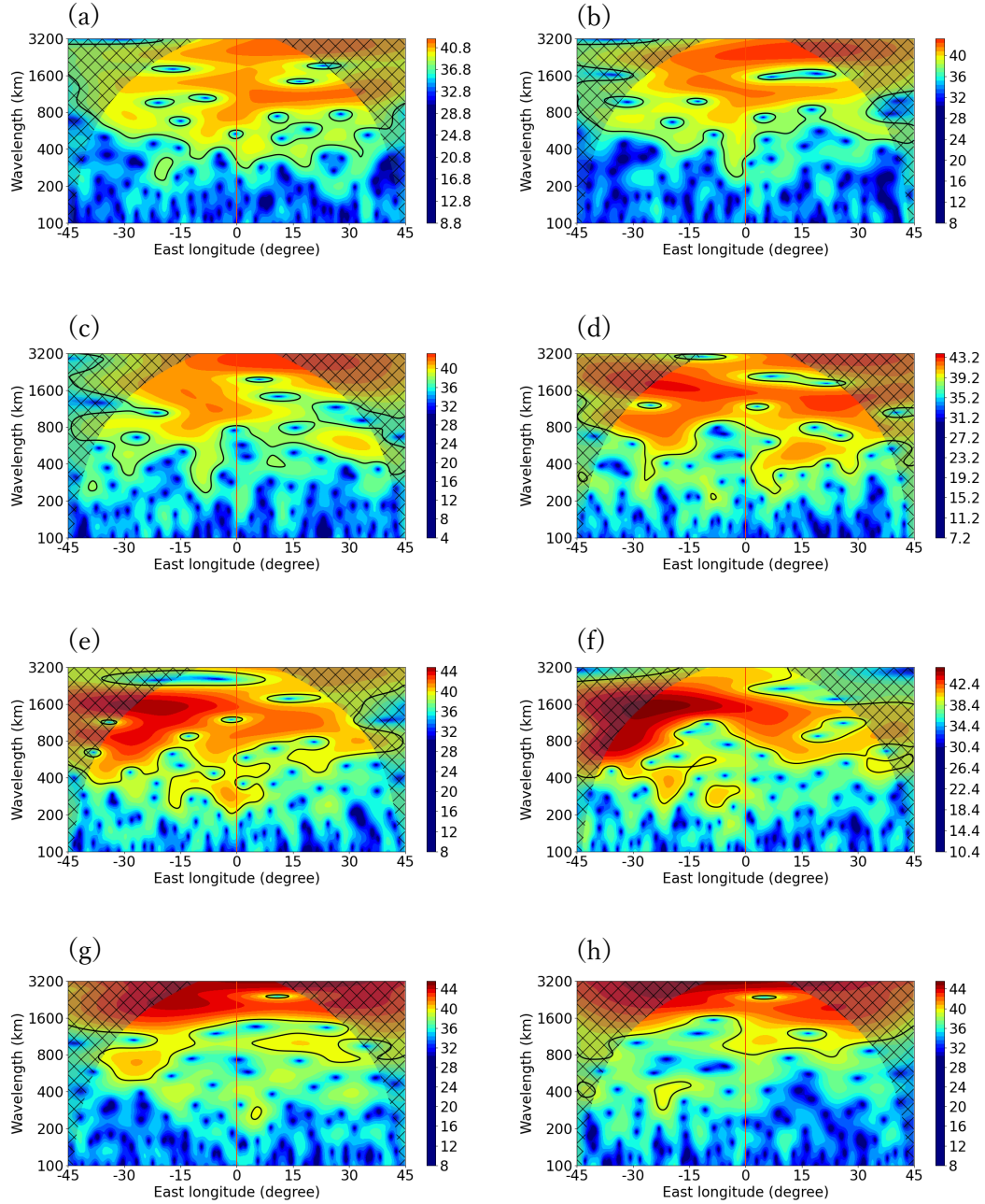


図 4.7 : 283 nm 紫外画像の, 赤道のデータの Wavelet 変換の結果. 横軸はローカルタイムが正午の経度を 0° とした場合の経度, 縦軸は波長の大きさ (km) を表している. (a)~(h) のデータの順番は, 表 4.1 に記載している順と同じである.

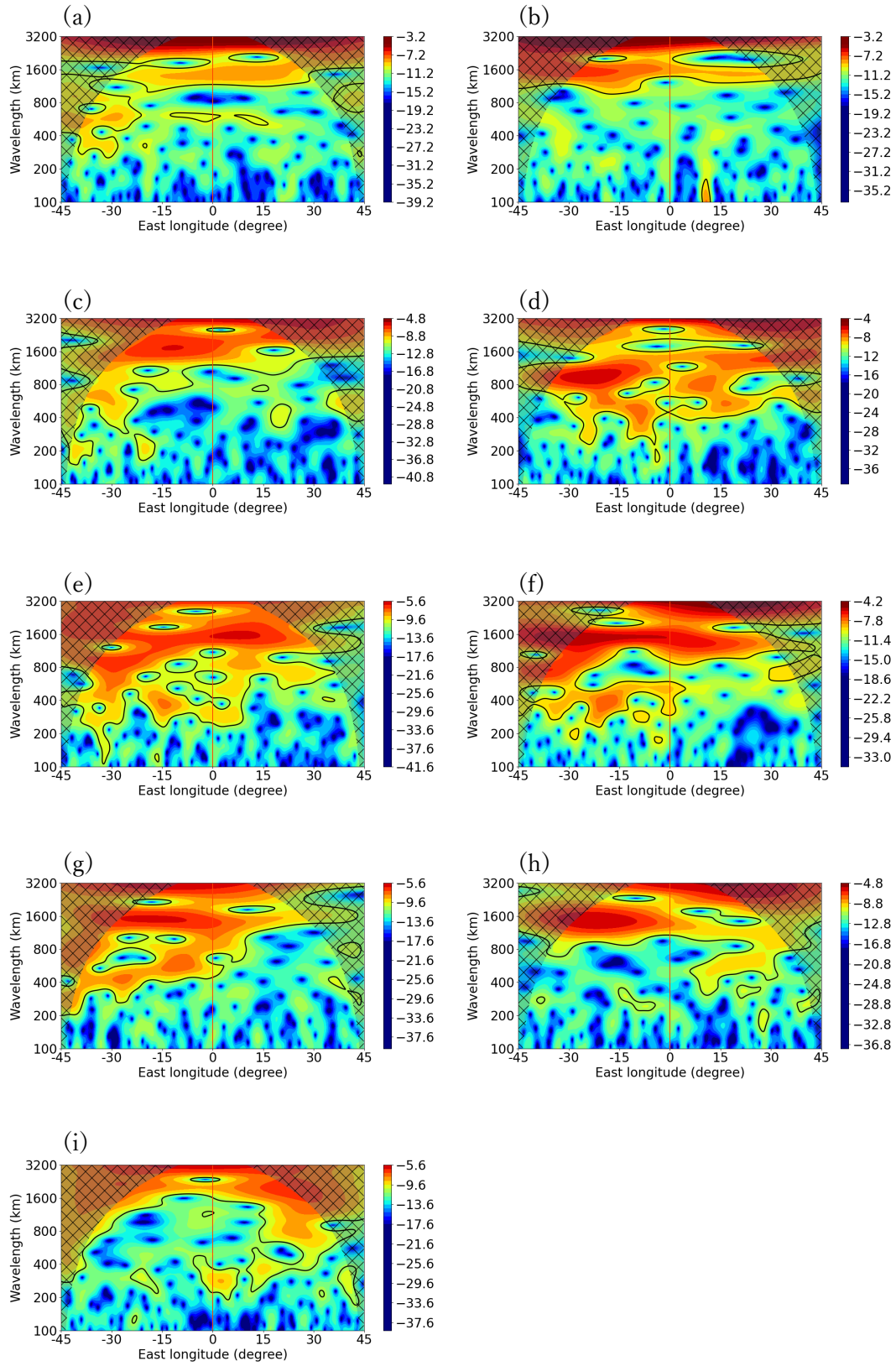


図 4.8 : 2.02 μm 赤外画像の Wavelet 変換の結果. 横軸と縦軸は図 4.7 と同様である. (a)~(i)のデータの順番は表 4.1 に記載している順と同じである.

Wavelet 変換の結果では, 283 nm 紫外画像, 2.02 μm の結果共に, 約 1000 km 以下の波長の成分にはあまり有意なピークが見られず, それ以上の波長の成分には信頼区間 95%を超える多くの極大が見られた. したがって, 約 1000 km よりも小さいスケールでは, 周期的とはいえないようなランダムな成分が多く存在し, それよりも大きいスケールでは波状構造が卓越していることが分かった. 解析するために取り出した 1 次元データや画像にもそのような特徴が見られる. 以上のことから, 約 1000 km 程度のスケールで雲層内の力学的なプロセスが変化する可能性が示唆される. 周期的とはいえないランダムな成分は対流を多く反映していると考えられるため, 約 1000 km 以下のスケールでは対流構造が卓越すると考えられる.

また, ローカルタイムによる極大の部分の振幅の大きさや極大が見られる頻度の差はあまり見られなかった.

5 フラクタル解析

5.1 フラクタル次元と Box counting 法

第 4 章の Wavelet 解析によって，構造の特徴が変化するスケールを定量的に評価した．この章では，フラクタル次元という，Wavelet 解析とは全く異なるアプローチからも特徴が変化するスケールの定量的な評価を試みる．

フラクタル(Fractal)とは，全体とその一部分とが自己相似形になっている図形や構造の総称である．この概念はマンデルブロにより 1975 年に提唱された．雲の形態や海岸線などはフラクタル構造を持つことが知られており，図 5.1 のような地球の雲のフラクタル性に関する研究はいくつかなされている [Lovejoy 1982; Nakayama et al. 1986]．しかし，自然界に存在しているフラクタル構造は，その構造が成り立つスケールの範囲が限られている．一方で数学的に構築したフラクタル構造も存在しており，この場合はスケールに関わらずフラクタル構造が成り立つ．一般に自然界に現れるフラクタル構造をランダムフラクタルと呼び，数学的に生成したフラクタル構造は決定論的フラクタルと呼ばれる．



図 5.1：地球での雲を撮影した画像．雲はフラクタル構造を持つことが知られている (2020 年 9 月 9 日 埼玉県さいたま市から撮影)．

ある構造を見るスケールを変化させたときに、構造がどの程度空間を満たしているかを示す指標としてフラクタル次元がある。一般にフラクタル次元は実数となる。フラクタル次元の定義は様々あるが、ここではコンピュータとの計算の相性が良く、広く使われている Box Counting 次元という値を用いる。Box Counting 次元の定義は以下の通りである：

$$N(h) \propto h^{-D} \quad (5.1)$$

ここで D はフラクタル次元を表す。また、空間内を一辺が h の Box で分割した時に、次元を求めたい構造と被覆した Box の個数を $N(h)$ とする。本研究では、グレイスケール化された画像に対しての Box Counting 次元を計算した。そこで、画像に対しての Box Counting 次元の計算方法[Nakagawa 2010]を紹介する。

グレイスケール化された画像の縦横のピクセル数をそれぞれ x, y とし、 (x, y) における画像の輝度値を $g(x, y)$ とおく。図 5.2 に概念図を示す。また、一辺が $h \times h$ の単位正方形領域上の $g(x, y)$ の標準偏差を σ とおく。このとき、単位正方形領域内の $g(x, y)$ の起伏を覆うのに必要な Box の(一辺が h の立方体)の個数を

$$\frac{\sigma}{h} \quad (5.2)$$

という値で近似的に求める。したがって、 $g(x, y)$ 全体の起伏を覆うのに必要な Box の個数は

$$N(h) = \sum_{i=1}^m \frac{\sigma_i}{h} \quad (5.3)$$

で求めることができる。ここで、 m は $g(x, y)$ を単位正方形で分割した際の正方形の個数を示す。図 5.3 に Box の個数の数え方の模式図を示す。 h の値を複数選択し、それに対応する $N(h)$ を計算し、その両対数プロットの回帰直線の傾きを求めることで次元 D を求める。定性的には、フラクタル次元の値が大きければ大きいほど、構造の振幅がより大きく、複雑であることを示している。

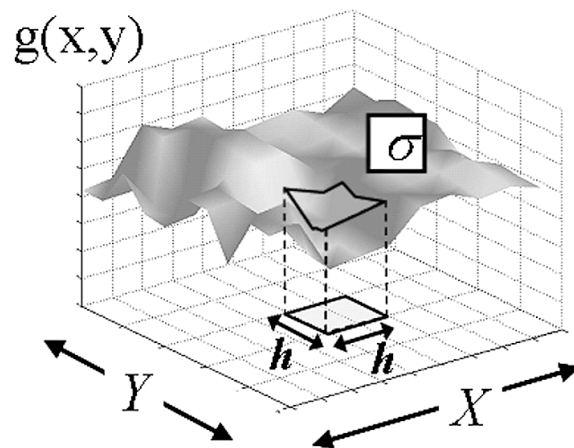


図 5.2：グレイスケール化された画像に対する Box counting 法の概念図 (Nakagawa 2010). X, Y は縦横それぞれのピクセル数を表しており, $g(x, y)$ はその座標に対応したグレイスケールの値を表している.

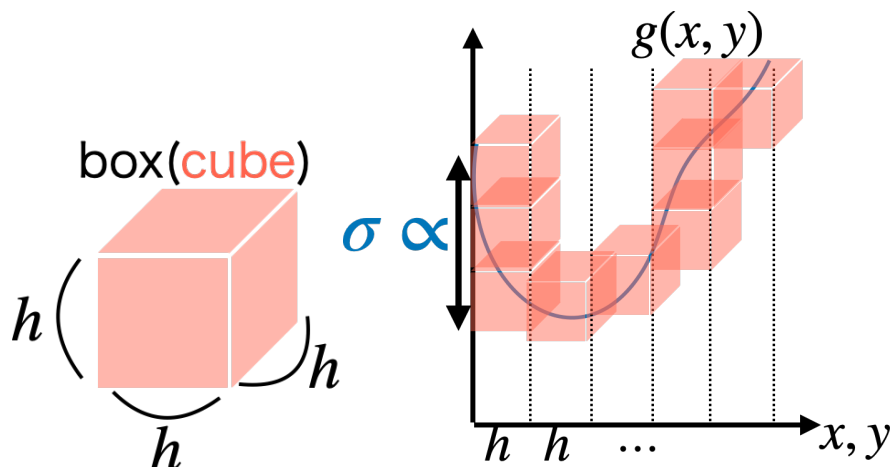


図 5.3：用いた Box と, Box の数え方の概念図. 単位正方形領域上の標準偏差の値が大きいほど画像の起伏が大きいと考え, 標準偏差を用いて近似的に Box を数える.

図 5.4 に金星探査機あかつきが撮影した紫外画像を用いた Box counting 法の一例を示す. 使用した金星の領域は経度方向に 45° , 緯度方向に 60° である.

ランダムフラクタルとみなせるスケールでは両対数プロット上で良く直線に乗る. 一方で, 両対数プロットにオレンジ色の円で示しているように, あるスケールを超えると, 回帰直線から外れる. そのようなスケールではフラクタル構造が見られなくなることを示している.

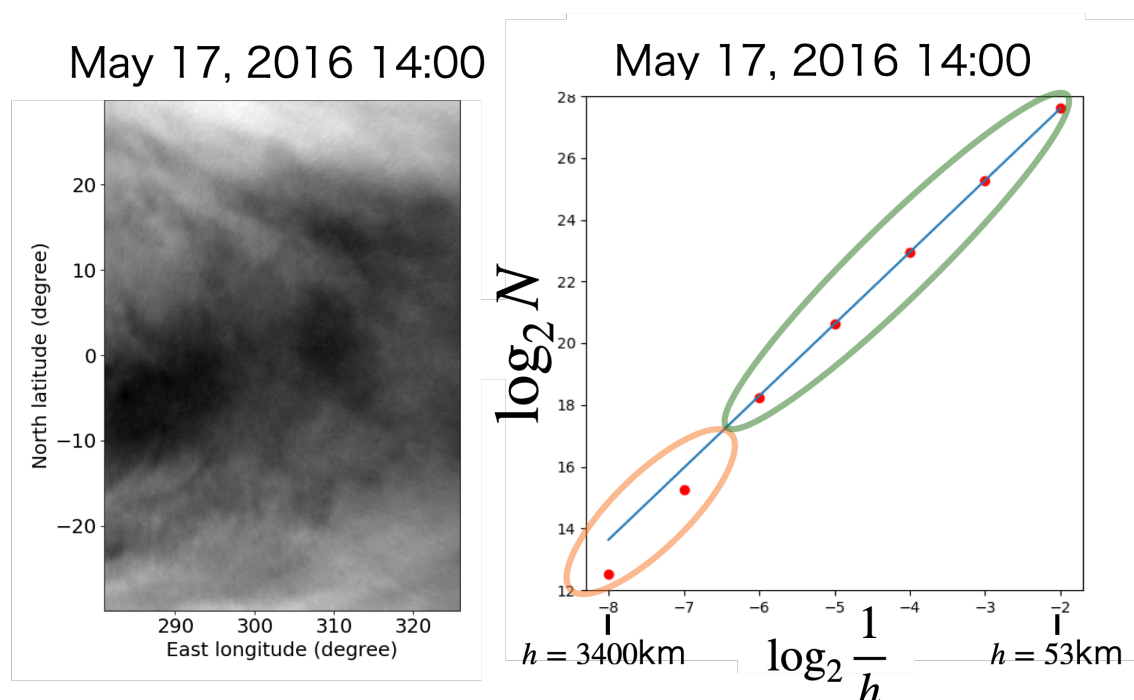


図 5.4 : Box counting 法の一例. 2016 年 5 月 17 日 14 時に撮影された 283 nm 紫外画像(左図)を使用した. 右図は様々な Box の一辺の長さ h に対応する $N(h)$ の両対数プロットを赤い点で示している. この場合, Box size である h の大きさは約 53 km から約 3400 km を選択した. オレンジ色の楕円で囲った 2 点は, 緑色の楕円で囲った 5 点に回帰した青い直線から外れている.

5.2 局所的フラクタル次元

直線から外れるスケールは、階層構造が変化することでフラクタル次元が変化するスケールと考えることができる。そのため、そのスケールでは雲形態内部の小さな構造の複雑さが変化していることが考えられる。したがって、金星の雲形態に変化が生じるスケールを、回帰直線から外れるスケールから特定した。スケールを求める際には以下の局所的フラクタル次元 D_n という値を用いた:

$$D_n = \frac{\log N(h_{n+1}) - \log N(h_n)}{\log \frac{1}{h_{n+1}} - \log \frac{1}{h_n}} \quad (5.4)$$

h_n は n 番目の Box の大きさを表している。局所的フラクタル次元は隣接している 2 点の傾きによって定義される。そのためフラクタル構造が保たれているスケールでは D_n の値は一定であり、 D_n が変化するスケールでは、内部構造の複雑さが変化するスケールであることがわかる。

本研究では、画像から低緯度付近の局所的フラクタル次元を計算するために、経度方向に東西 45°, 緯度方向に南緯 30°~北緯 30°の部分抽出した。解析に用いた画像の一例を図 5.5 に示す。

また、使用したデータは以下の表の通りである。

波長	データの撮影日	データ数
283 nm	2016 年 4 月 25 日 ~2018 年 11 月 27 日	ローカルタイム午前: 35 ローカルタイム午後: 32
2.02 μm	2016 年 4 月 25 日 ~2016 年 5 月 17 日	ローカルタイム午前: 9 ローカルタイム午後: 9

表 5.1: 局所的フラクタル次元の計算に用いたデータの波長, 撮影日, データ数. データは位相角が 50°以下, 解像度は約 17.0 km/pixel~26.0 km/pixel である. 位相角があまり大きくなく, 解像度が撮影日によってあまり変化しないようにデータを選択した。

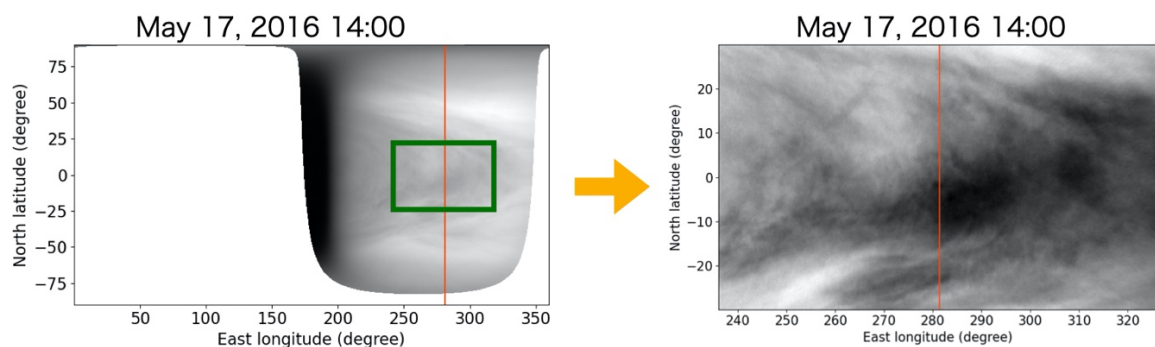


図 5.5：計算に用いた画像の一例. 低緯度付近のみを切り出して解析に用いている. また, ローカルタイム依存性の有無にも注目をするため, 経度方向にはローカルタイム正午の経度を境にそれぞれ 45° を切り出してある.

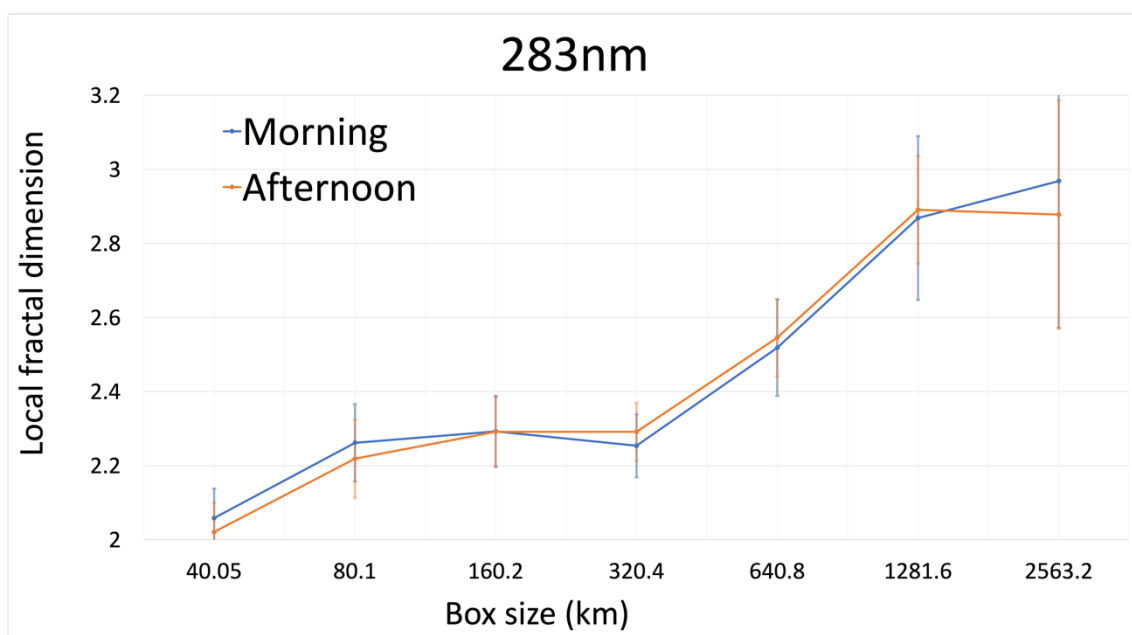


図 5.6：波長 283 nm の紫外画像から得られた局所的フラクタル次元の結果. 横軸は Box size (km) を表しており, 値を導出するために用いた 2 つの Box size の平均値である. 縦軸はその Box size に対する局所的フラクタル次元を示している. データの平均値が点で表されており, エラーバーは \pm 標準偏差となっている. また, 青線はローカルタイム午前, 橙色の線はローカルタイム午後のデータの結果を表す.

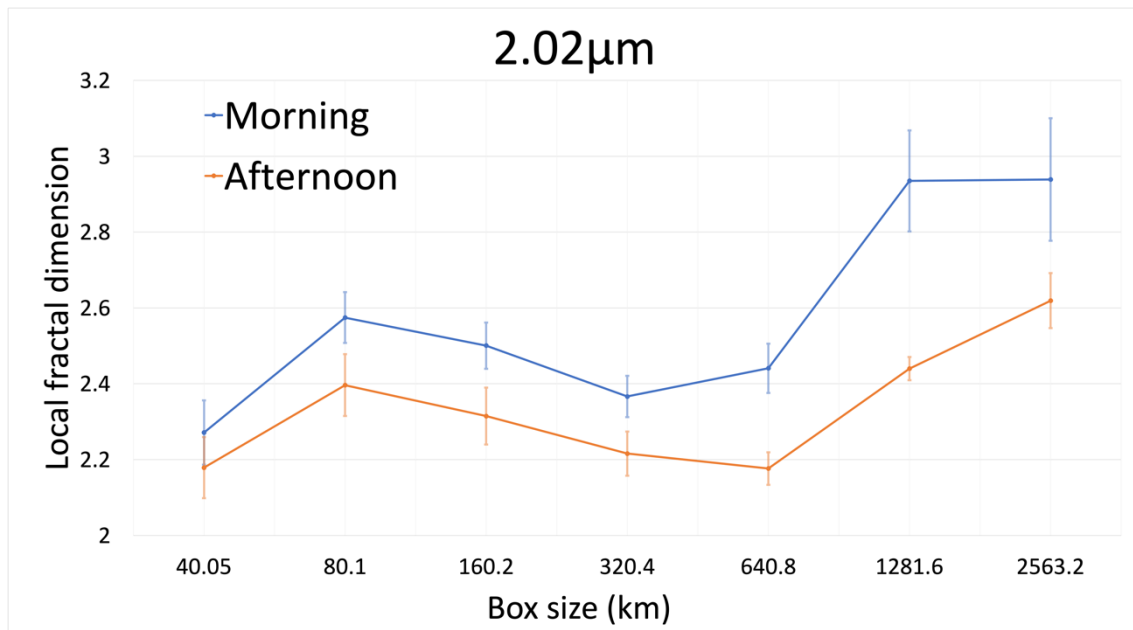


図 5.7 : 2.02 μm 赤外画像での局所的フラクタル次元の結果. 図の見方は図 5.6 と同様.

5.3 考察

図 5.6, 5.7 の局所的フラクタル次元の結果を見ると, 283 nm 画像の場合では Box size が 320~640 km, 2.02 μm 画像の場合では 640~1280 km の間で相対的に値が変化している. 次元が変化ということは, 雲の内部構造の複雑さが変化していることを定性的に示唆している. このことから, 約 500~1000 km のスケールで雲形態を作るプロセスが変化していることが示唆される. これは第 4 章の Wavelet 解析の結果とも整合性がとれている. 以上 2 つの解析結果から, 約 1000 km のスケールが特徴的なスケールであることが示唆される. 約 1000 km よりも大きいスケールでは準周期的な構造が卓越し, フラクタル次元が大きい. 一方でそれより小さいスケールでは準周期的と見なせないランダムな構造が卓越し, フラクタル次元が小さくなる. フラクタル次元に関しては 40~80 km の部分でも値の変化が見られるが, これは画像の解像度が約 17.0 km/pixel~26.0 km/pixelであることを考えると, 40~80 km は画像内で 2~3 ピクセル程度であり, 見ている画素数が非常に少ないため, 有意なデータかどうか判断が難しい.

また, ローカルタイム別の差は 283 nm 画像では見られなかったが, 2.02 μm 画像では午前の方が次元の値は大きかった. 次元の値そのものには未だ物理的な意味は見出されていないが, 一般的に次元の値が大きいほど構造が複雑であることを示しているため, フラクタル次元の観点では 2.02 μm 画像は午前側が複雑であると言える.

さらに, フラクタル次元の計算方法は複数あるため, 計算方法を変更した場合に次元の値がどのように変化するのは今後の課題である.

6 微細構造の時間変化の周期解析

6.1 雲の微細構造の変動性

第1章で述べたように、金星大気を紫外波長で観察すると、惑星規模の雲のコントラストが見られる。一方で惑星規模のコントラストの中に細胞上の細かい構造も見られる。この微細な構造が変動していることは以前から知られており、対流によって生成されると考えられている。主に金星午後側で見られると考えられている[Titov et al. 2012]が定量的な評価はなされていない。微細な構造が現れる周期も定かではなく、そもそも周期性が見られるのかさえ知られていない。

惑星規模の明暗だけではなく、微細構造にも周期性があるとするれば、惑星規模の明暗を生じさせている波動との連動を探ることができる。惑星規模の波動と、その中の微細な構造を作り出すと考えられている対流との関連性を調べることは、雲の形成過程を解明するための1つの大切な情報であると考えられる。

したがってこの章では、その微細な雲構造の変動性に注目をして、周期性を調べる。そして周期性がある場合には、惑星規模の明暗と比較をすることで、大規模な波動と、その中の構造がどのような関係を持っているのかを調べる。

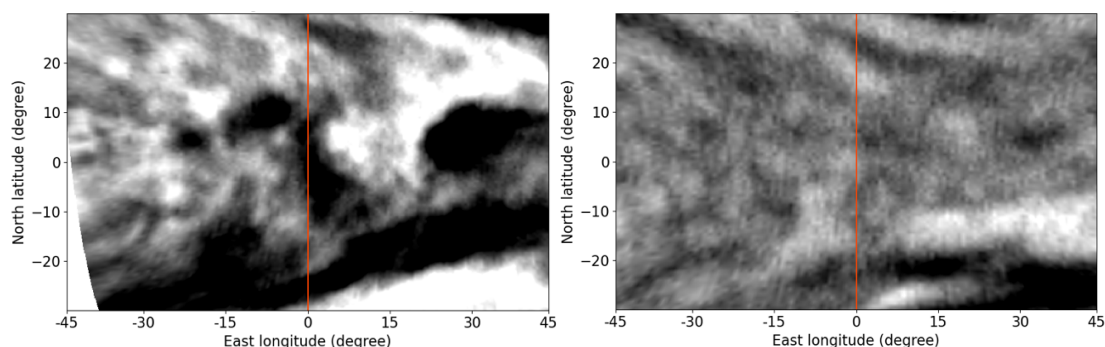


図 6.1：微細な構造を取り出した画像。ハイパスフィルタを画像にかけることで約 1200 km 以下の構造のみを取り出した。赤い線は金星上での正午の経線を表しており、2つの画像のカラーバーは同じである。左図は 2018 年 10 月 26 日 20 時に撮影されており、その時の画像の空間分解能は約 58 km/pixel。右図は 2018 年 10 月 28 日 19 時に撮影されており、その時の画像の空間分解能は約 75 km/pixel である。

図 6.1 の 2 画像を見比べると、左図は右図と比較して明暗のコントラストがはっきりしているのが観察できる。また、連続的に撮影された画像を見ると、コントラストが大きい場合と小さい場合が繰り返し現れていることがわかる。

本研究では、このような変動性を画像内の標準偏差の大きさによって定量的に評価することを試みる。この試みにより、変動の周期を定量的に判断することができる。

6.2 位相角に依る明るさの補正

Minneart Law では光の入射角、出射角に依存する明るさの補正を行った。しかし、位相角依存性は除去していない。連続的に撮影された画像を用いて解析を行う際には、探査機の軌道周期に伴って位相角が変化するため、位相角に依る明るさの変動を除去して解析を行う方が良い。そこで本研究ではドイツ航空宇宙センター(DLR)の Lee Yeon Joo 博士が、図 6.2 のように、あかつき UVI データから位相角と全球平均アルベドの関係性を多数のデータに fitting して経験的に得られた 4 次多項式を用いて、位相角依存性を取り除く [Lee et al. 2019]。

アルベドを A 、位相角を α (degree)とした場合、283 nm 画像では

$$A(\alpha) = 0.59833499 - 0.021021799\alpha + 0.00042929144\alpha^2 - 4.1064112 \times 10^{-6}\alpha^3 + 1.6082283e \times 10^{-8}\alpha^4 \quad (6.1)$$

365 nm 画像では

$$A(\alpha) = 0.70259118 - 0.018853930\alpha + 0.00036374861\alpha^2 - 3.4318567 \times 10^{-6}\alpha^3 + 1.3748240 \times 10^{-8}\alpha^4 \quad (6.2)$$

という近似式が成り立つ。この式を用いてアルベドを計算し、画像の輝度値を得られたアルベドで割ることで補正を行った。式(6.1), (6.2)の関数を図 6.3 に示す。

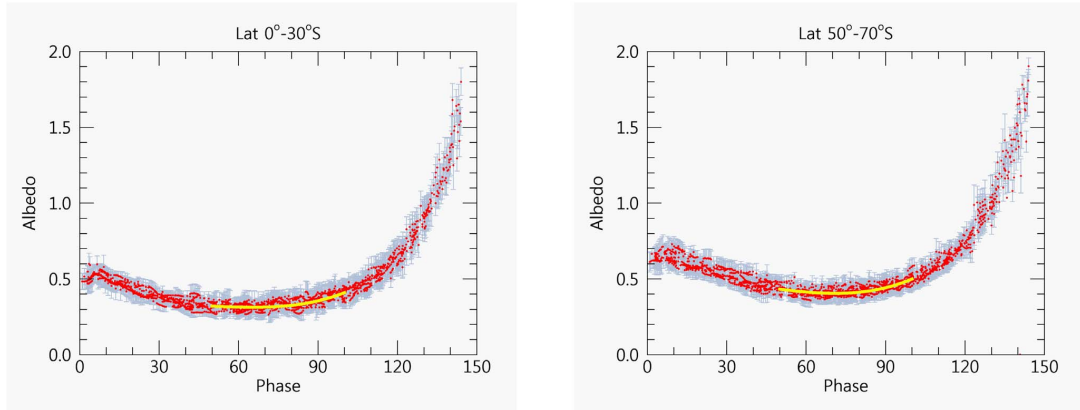


図 6.2 : 365 nm 紫外画像の, 位相角とアルベドの関係のプロット (Lee et al. 2019). 左図は緯度 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$, 右図は緯度 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ の場合のデータを表している. 赤い点が観測データであり, エラーバーは標準偏差を示している. 黄色線は多項式 fitting を行った曲線を示している.

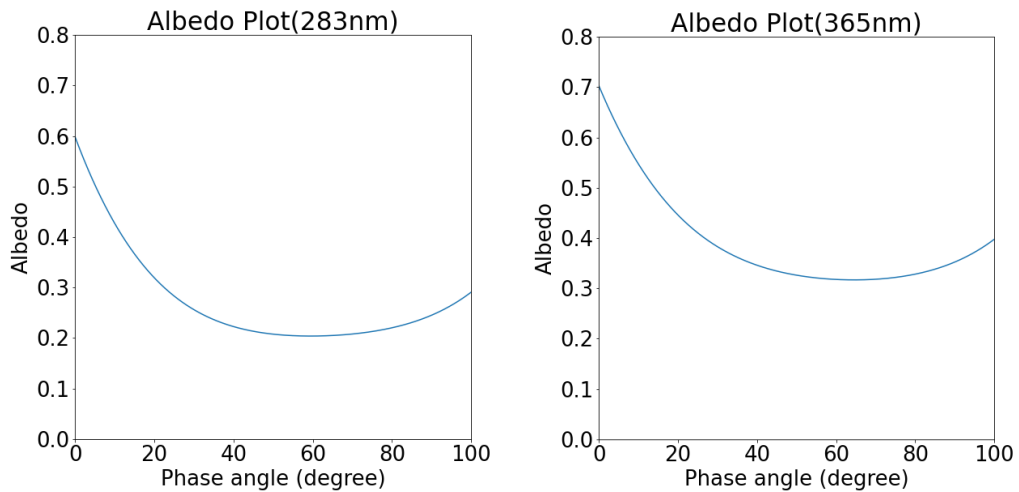


図 6.3 : 位相角依存性を取り除くために用いた多項式 fitting の式の図. 左図が 283 nm, 右図が 365 nm 紫外画像に用いた関数になっている.

6.3 微細構造の標準偏差と惑星規模輝度の時系列

撮影された惑星スケールの明暗の時間周期は時期によって変化しているため [Imai et al. 2019], そのような時期による周期性の変化も考慮に入れて解析を行いたい. そこで本研究では, 期間が半年ほど空いている 2 つの異なる期間 (Period 1, Period 2) のデータを解析した. 取得した期間は, 画像ができる限り短い間隔で長期的に撮影されており, さらに探査機の遠金点が昼側にあつて位相角が大きい場合のデータが少ないように選択した. Period 1 は 2018 年 2 月 28 日から 2018 年 4 月 19 日の 51 日間であり, 283 nm 画像は 399 データ, 365 nm 画像は 396 データである. Period 2 は 2018 年 10 月 15 日から 2018 年 11 月 23 日の 40 日間であり, 283 nm 画像, 365 nm 画像ともに 349 データである. ほとんどの画像は 2 時間おきに撮影されている一方で, 所々で 8 時間ほど間隔が空いている時間帯もある. 緯度経度座標系に展開された画像の, 北緯 20°~南緯 20°, 経度方向はローカルタイム正午の経度を境に東西 30°ずつ切り取ったものを解析に使用した.

解析では微細な雲構造の振幅の指標である標準偏差とその背景の明暗に注目した. フラクタル解析や Wavelet 解析の結果より, 雲構造が約 1000 km 程度のスケールを境に変化し, それよりも小さいスケールでは対流構造が卓越すると考えられるため, 標準偏差は約 1200 km 以下の構造を取り出すためのハイパスフィルタをかけた画像を使用して計算する. ハイパス処理は, ガウシアンフィルタで平滑化した画像を元画像から差し引くことで行う. ガウス関数は

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\Delta^2} e^{-\left(\frac{x^2+y^2}{2\Delta^2}\right)} \quad (6.3)$$

を用いた. ここで, x, y はピクセル座標である. Δ の値を 48 とした. 48 ピクセルは金星上の緯度経度 6° に対応する. このとき, 平滑化の幅は約 2Δ であり, 金星上で約 1281.6 km である.

標準偏差の値は, あかつきと金星との距離による解像度に依存してしまう可能性があるため, ローパスフィルタをかけて解像度を一定にした画像を用いて計算を行った. 解析に使用した画像の解像度は, 最も悪い場合, 約 78 km/pixel である. したがって全ての画像にガウシアンフィルタをかけて, 解像度が約 80 km/pixel になるように画像処理を行なった. この処理では, 式(6.3)の Δ の値を 3 にして行った. 3 ピクセルは金星上の緯度経度 0.375° に対応する. 平滑化の幅は, 金星上の約 80.1 km に対応する. 惑星スケールの波動に影響されると考えられる惑星規模の明暗は, ハイパス, ローパス処理を行う前の画像内の輝度値

の平均値を指標として用いた．これより微細構造の標準偏差を σ ，惑星規模の輝度を I として結果を述べる．図 6.4 に計算で用いた画像の一例を示す．

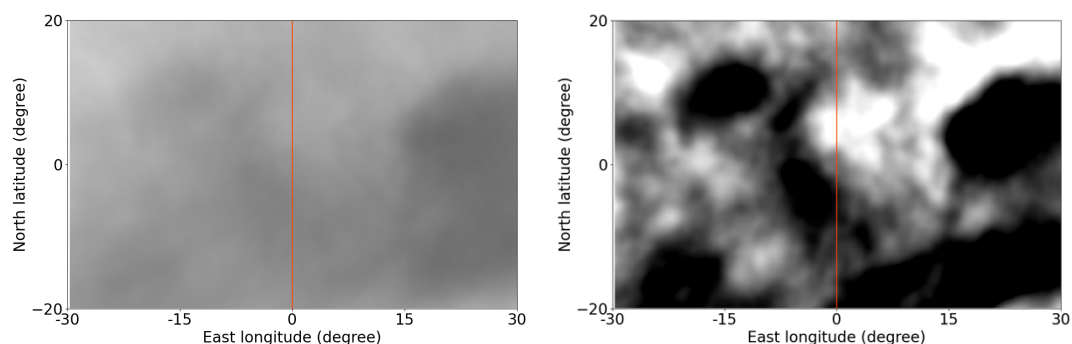


図 6.4：惑星規模の輝度を計算するために Minneart Law による処理を行なった画像(左図)とそこからハイパス処理とローパス処理を行い，微細構造の標準偏差を求めるために用いた画像(右図)．左右の画像の階調は異なる．2018 年 10 月 26 日 22 時に撮影された 365 nm 紫外画像を使用．

以下にそれぞれの時系列のプロットを示す． I と σ はそれぞれ各時系列内の平均値で割って規格化がなされている．変動の大きさは peak-to-peak で I は 0.5 ほど， σ は約 1 であった．また，数日周期程度の変動が見られた．

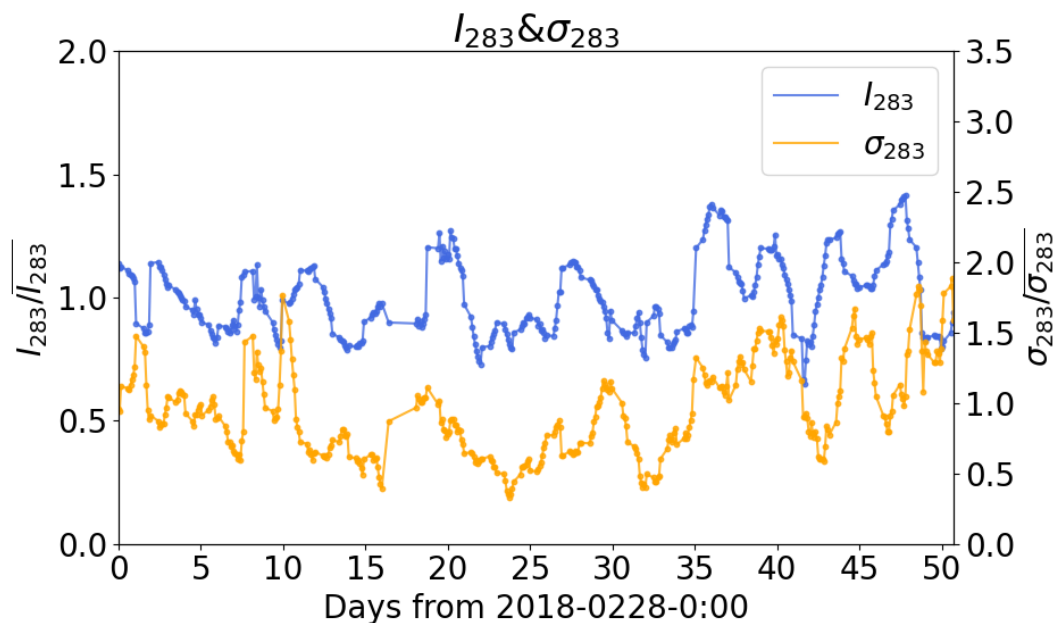


図 6.5 : Period 1(2018 年 2 月 28 日~)の波長 283 nm における惑星規模の輝度値 I (青線)と微細構造の指標 σ (オレンジ線)の時系列. 横軸は日数, 縦軸の値は各時系列内の平均値で割ることで規格化がなされている.

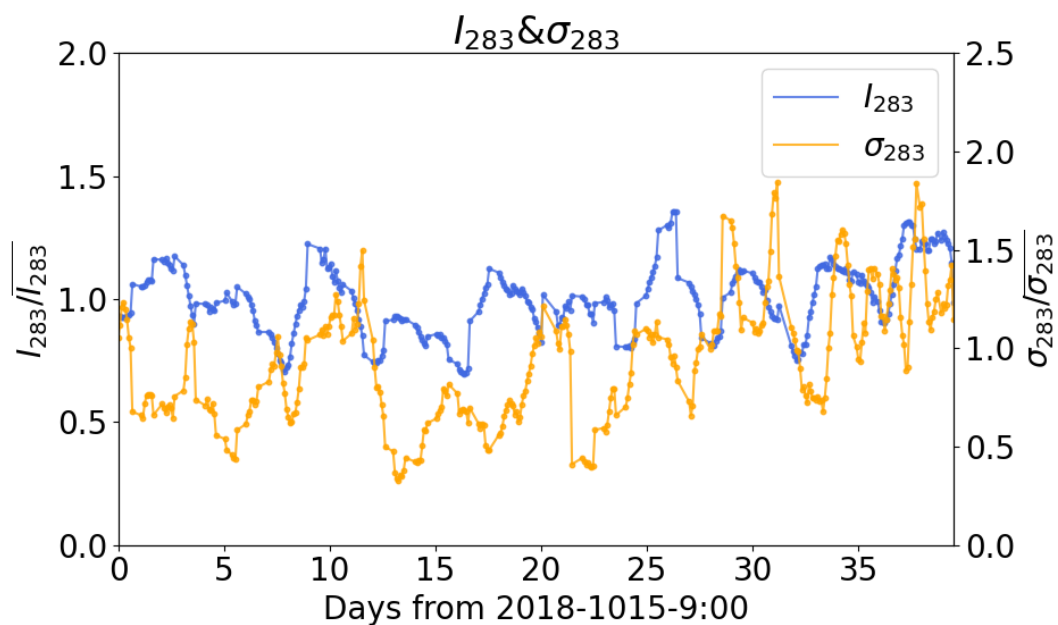


図 6.6 : Period 2(2018 年 10 月 15 日~)の波長 283 nm における惑星規模の輝度値 I (青線)と微細構造の指標 σ (オレンジ線)の時系列. 見方は図 6.5 と同様.

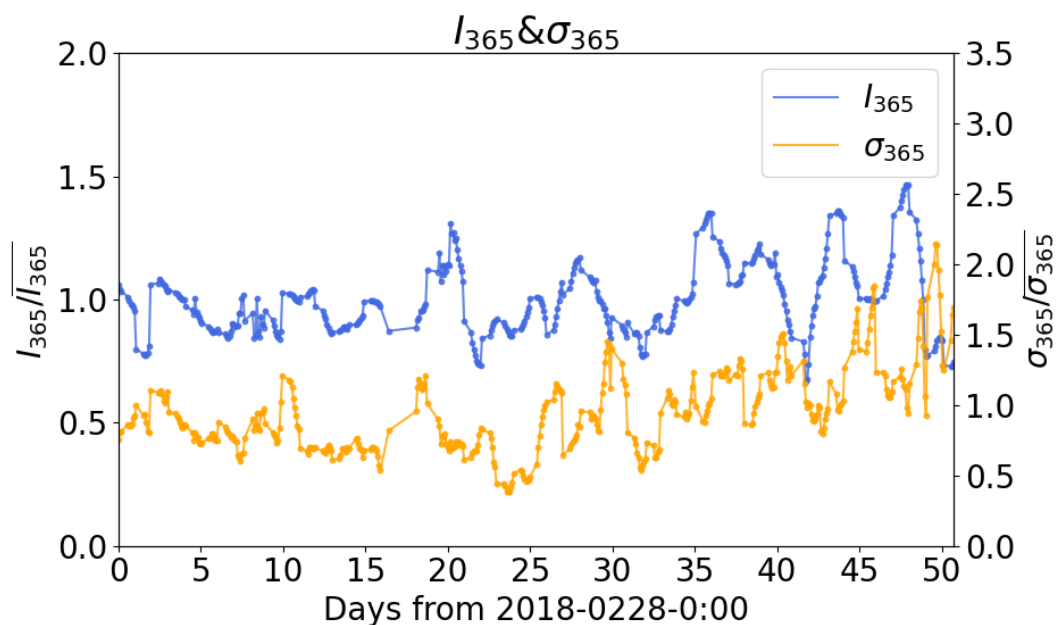


図 6.7 : Period 1(2018 年 2 月 28 日~)の波長 365 nm における惑星規模の輝度値 I (青線)と微細構造の指標 σ (オレンジ線)の時系列. 図の見方は図 6.5 と同様.

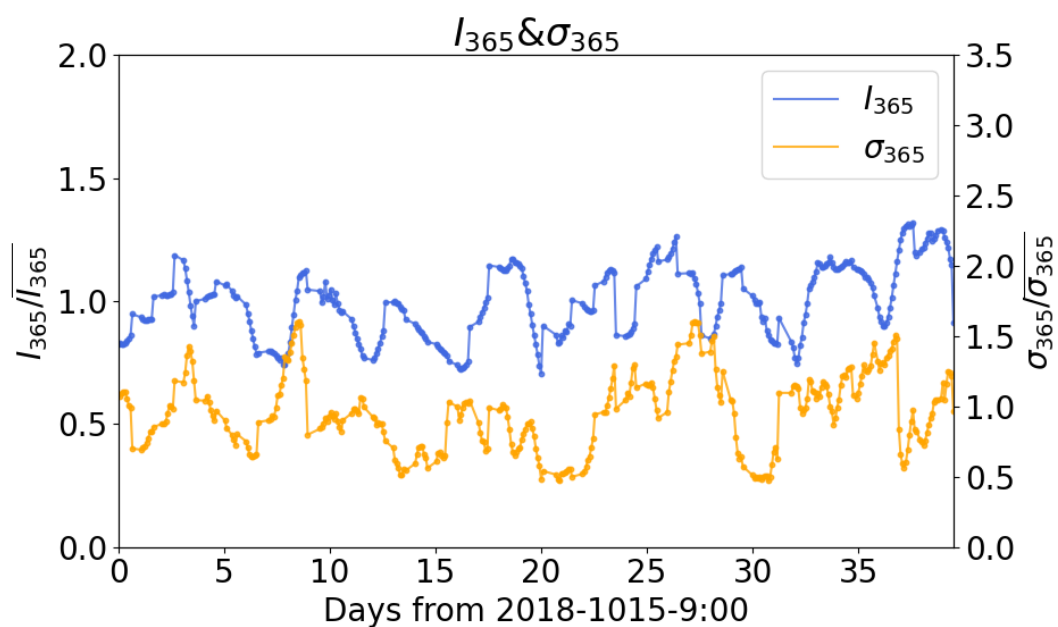


図 6.8 : Period 2(2018 年 10 月 15 日~)の波長 365 nm における惑星規模の輝度値 I (青線)と微細構造の指標 σ (オレンジ線)の時系列. 図の見方は図 6.5 と同様.

6.4 周期解析

6.3 節の図 6.5~6.8 の時系列を周期解析することで背景の明るさ、微細構造それぞれの周期成分を調べる. FFT は周波数分解能がきちんと決まり、解析結果が評価しやすいというメリットがある. しかし FFT を行うためにはデータ間隔が均等でなければいけないという制限がある. Lomb-Scargle ピリオドグラム [Scargle 1982] という周期解析の方法は非均等な時系列データも周期解析を行うことができる一方で、高周波側でしばしば人工的なものと考えられるピークが見られる. このように FFT と Lomb-Scargle ピリオドグラムにはメリットとデメリットどちらも存在するため、本研究では線形補間した時系列を FFT した結果と、Lomb-Scargle ピリオドグラムの両方を用いて周期性を調べた. 実際には Kouyama et al. [2013] で使用されている Lomb-Scargle ピリオドグラムの式を解析に使用した. 以下にその式を示す.

ある時間 t_i におけるデータを y_i とする, N 個からなる時系列データ ($i = 1, 2, 3 \dots N$) があるとき, ある角周波数 ω におけるスペクトルの大きさを $P(\omega)$ とすると, Lomb-Scargle ピリオドグラムでは,

$$P(\omega) = \frac{2}{N} \left[\frac{(\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}) \cos \omega(t_i - \tau))^2}{\sum_{i=1}^N (\cos \omega(t_i - \tau))^2} + \frac{(\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}) \sin \omega(t_i - \tau))^2}{\sum_{i=1}^N (\sin \omega(t_i - \tau))^2} \right] \quad (6.4)$$

という形で書ける. ここで, τ は位相因子と呼ばれる値であり,

$$\tan(2\pi\tau) = \frac{\sum_{i=1}^N \sin 2\omega t_i}{\sum_{i=1}^N \cos 2\omega t_i} \quad (6.5)$$

を満たす. また,

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (6.6)$$

を満たす.

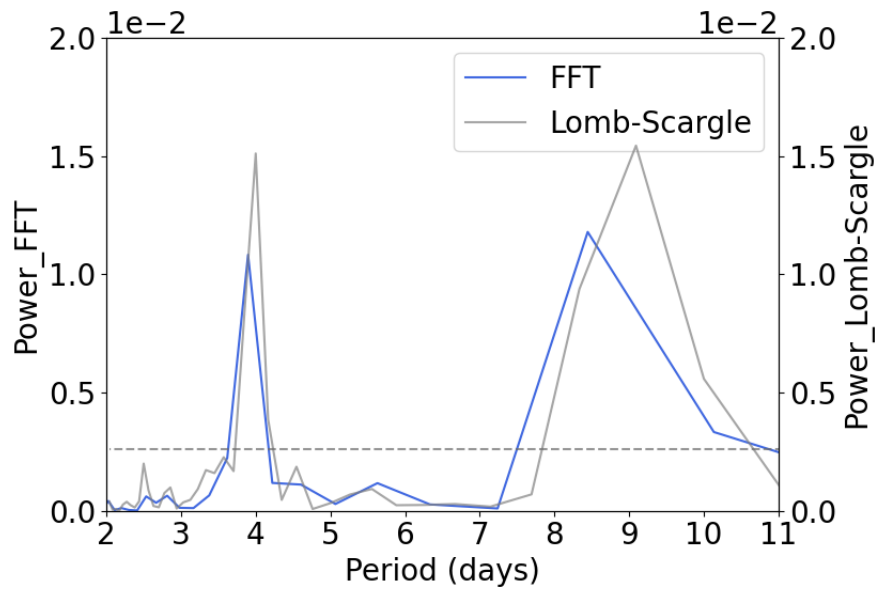


図 6.9 : Period 1 における 283 nm 画像の惑星規模の輝度値 I の Lomb-Scargle ピリオドグラムと FFT によるスペクトル. 青線が FFT の結果, 灰色の線は Lomb-Scargle ピリオドグラムの結果を示している. 灰色の点線は Lomb-Scargle ピリオドグラムの検出確率 99%のラインを示している.

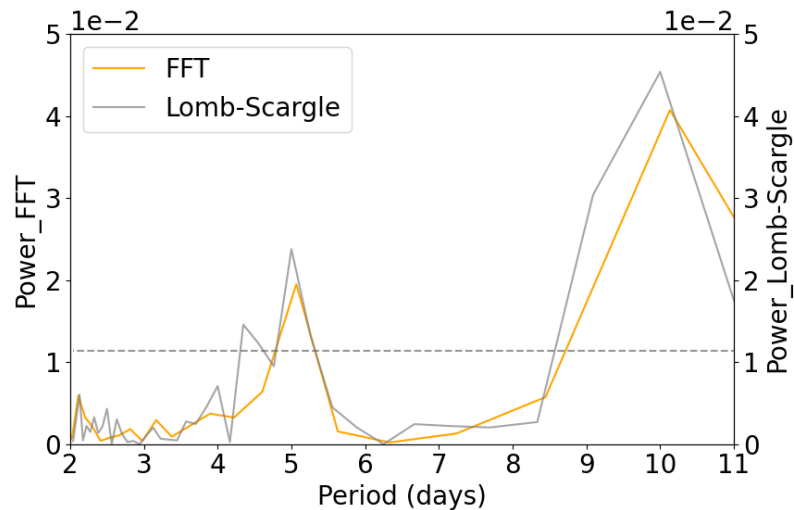


図 6.10 : Period 1 における 283 nm 画像の微細構造の標準偏差 σ の Lomb-Scargle ピリオドグラムと FFT によるスペクトル. 橙色の線が FFT の結果, 灰色の線は Lomb-Scargle ピリオドグラムの結果を示している. 灰色の点線は Lomb-Scargle ピリオドグラムの検出確率 99%のラインを示している.

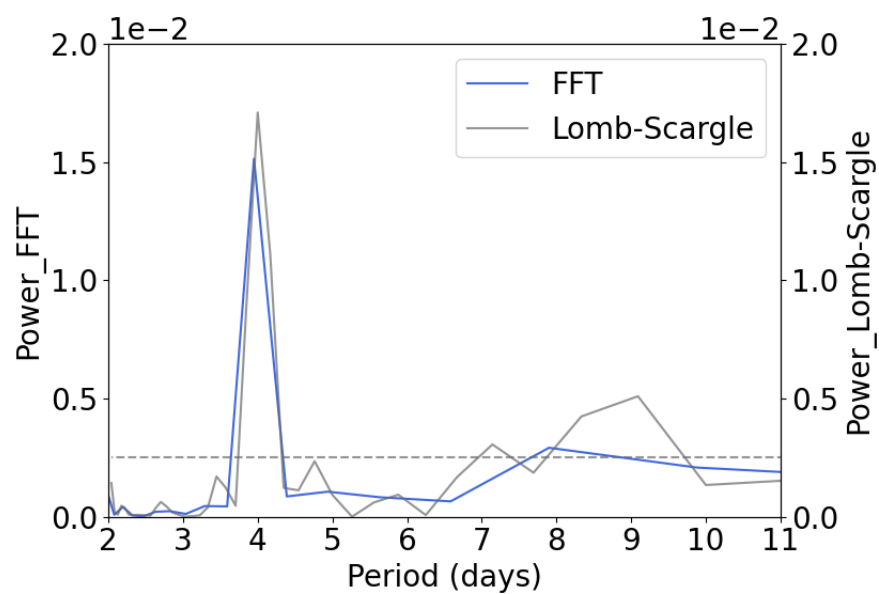


図 6.11 : Period 2 における 283 nm 画像の惑星規模の輝度値 I の Lomb-Scargle ピリオドグラムと FFT によるスペクトル. 見方は図 6.9 と同様.

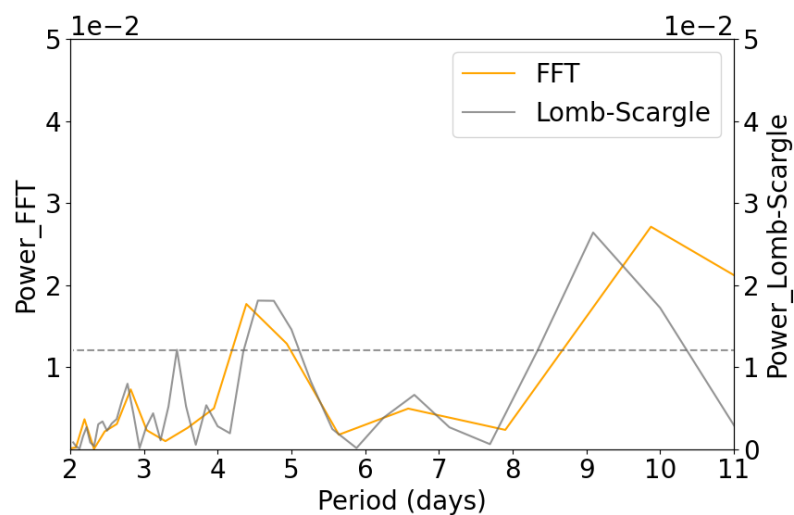


図 6.12 : Period 2 における 283 nm 画像の微細構造の標準偏差 σ の Lomb-Scargle ピリオドグラムと FFT によるスペクトル. 見方は図 6.10 と同様.

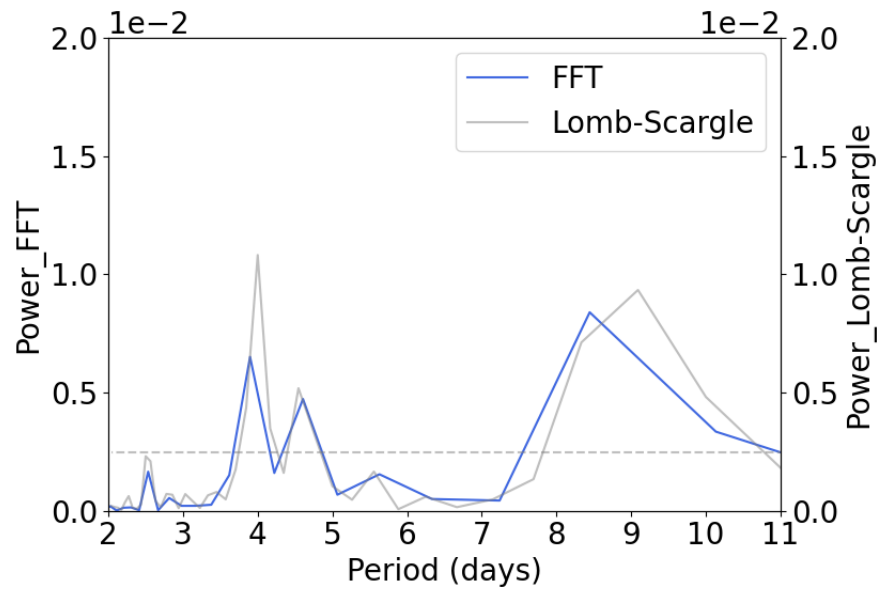


図 6.13 : Period 1 における 365 nm 画像の惑星規模の輝度値 I の Lomb-Scargle ピリオドグラムと FFT によるスペクトル. 見方は図 6.9 と同様.

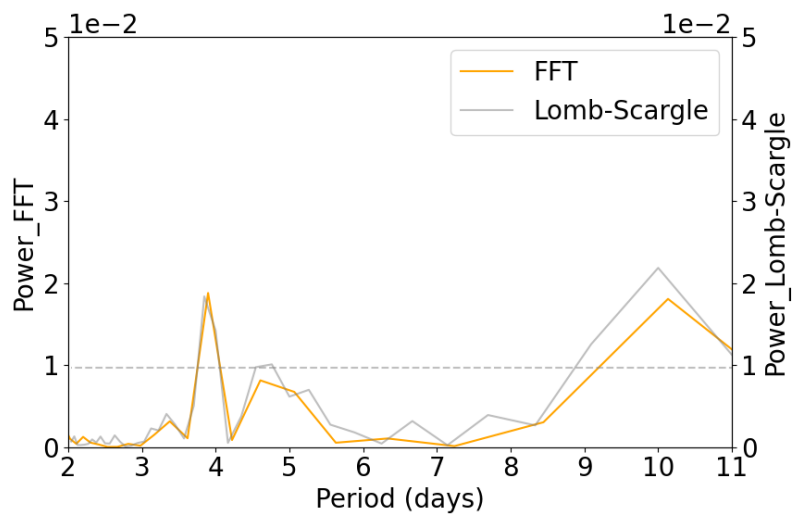


図 6.14 : Period 1 における 365 nm 画像の微細構造の標準偏差 σ の Lomb-Scargle ピリオドグラムと FFT によるスペクトル. 見方は図 6.10 と同様.

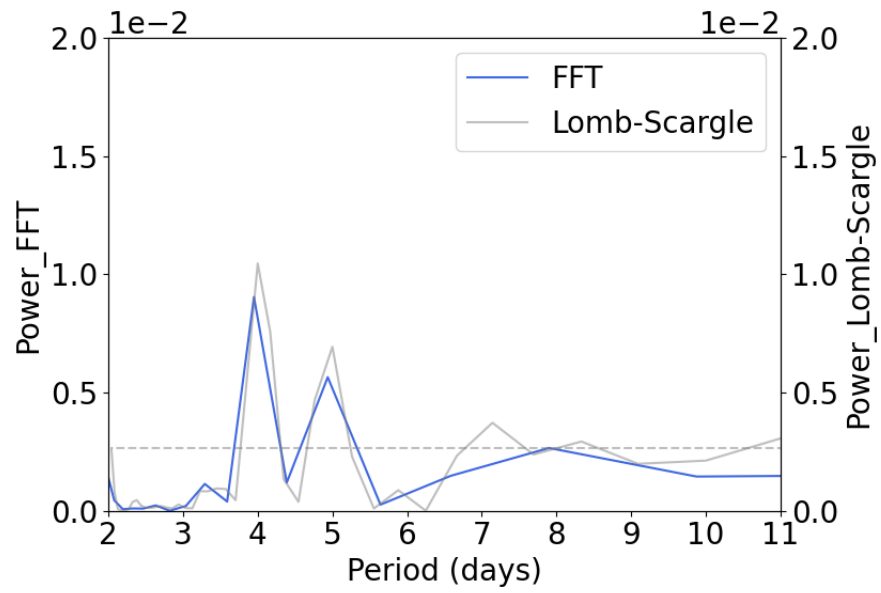


図 6.15 : Period 2 における 365 nm 画像の惑星規模の輝度値 I の Lomb-Scargle ピリオドグラムと FFT によるスペクトル. 見方は図 6.9 と同様.

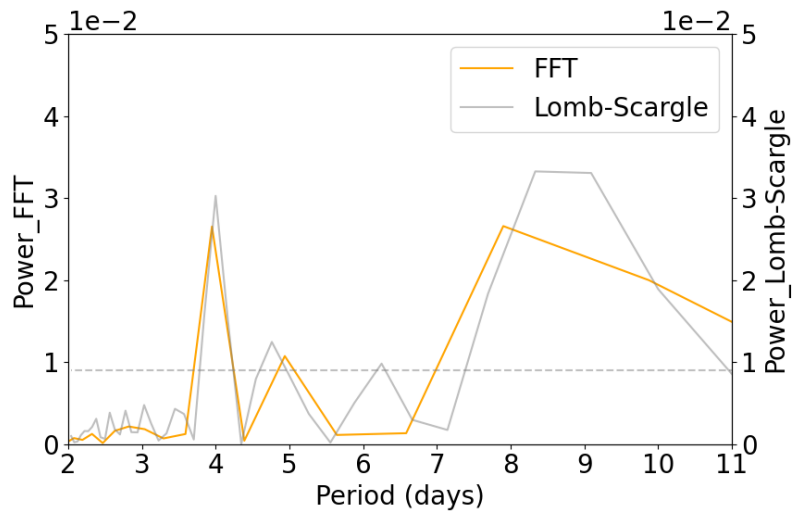


図 6.16 : Period 2 における 365 nm 画像の微細構造の標準偏差 σ の Lomb-Scargle ピリオドグラムと FFT によるスペクトル. 見方は図 6.10 と同様.

図 6.9~6.16 の周期解析の結果を見ると, FFT と Lomb-Scargle ピリオドグラムの結果共に, 惑星規模の輝度値と微細構造の標準偏差は 4~5 日周期に極大を示すことがわかる. また, FFT と Lomb-Scargle ピリオドグラムの結果に共通して存在する 8 日以降の周期成分に関しては, 取り除けていない探査機の軌道周期の影響であると考えられる. 惑星スケールの明暗に関しては以前から 4~5 日周期で変動することが知られていたが, 今回注目している微細構造の振幅が周期変動することを発見したのは本研究が初である.

次に研究当初の目的であった, 惑星規模の変動と微細構造の変動との関連性を調べる. そこで, 特に惑星規模の輝度値と微細構造の周期性で共通に見られる約 4~5 日で変動する成分の関連性を調べるため, そのような成分のみを取り出して逆 FFT を行った. 取り出す成分はピークの幅も考慮し, 約 3~6 日の周期成分を取り出した. 283 nm 画像の結果では惑星規模の輝度値 I は主に 4 日周期の成分を持ち, 微細構造の標準偏差 σ は 4.5~5 日周期の成分を持っている. 365 nm 画像の結果は I と σ ともに 4 日と約 4.5~5 日周期の両方の成分を持っている.

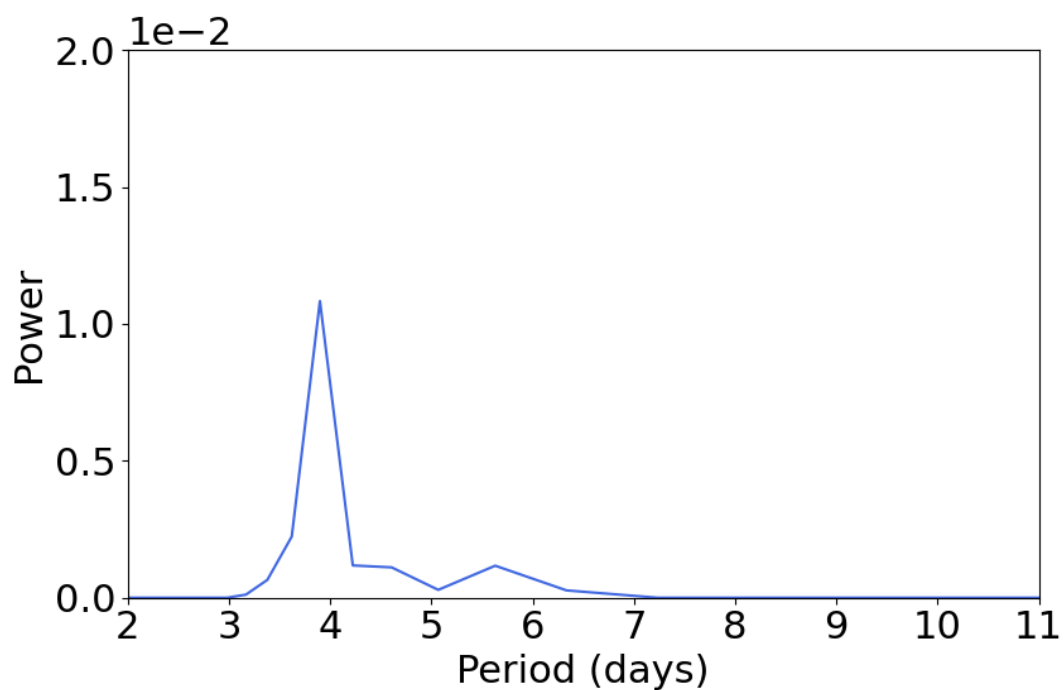


図 6.17 : Period 1 の 283 nm 画像における惑星規模の輝度値 I の FFT スペクトルから周期約 3~6 日の成分のみを取り出したもの.

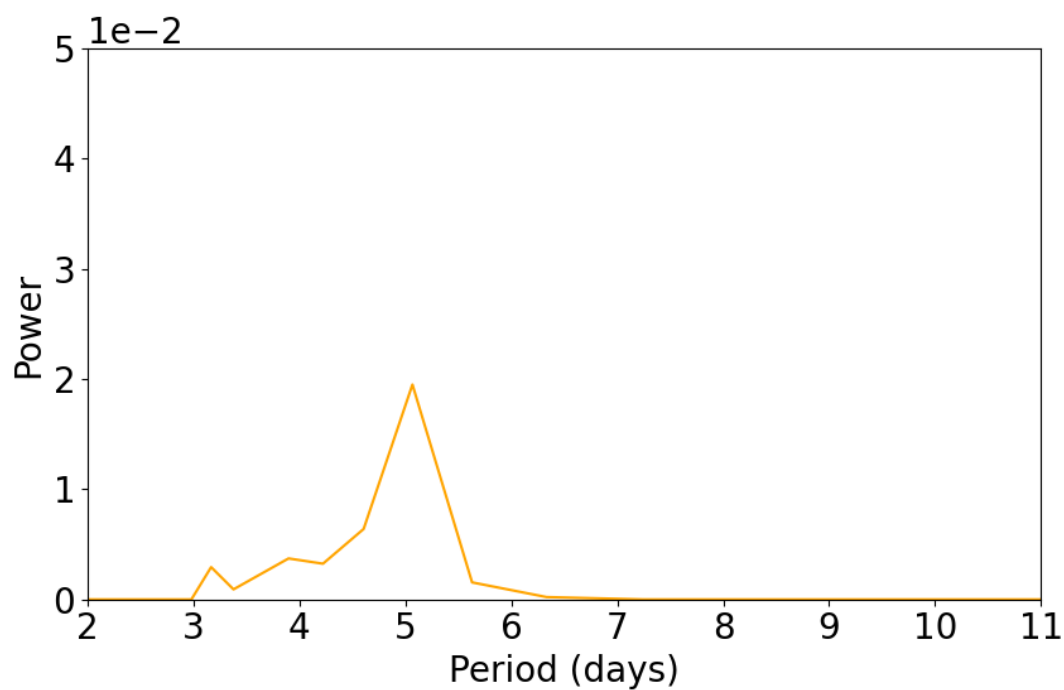


図 6.18 : Period 1 の 283 nm 画像における微細構造の標準偏差 σ の FFT スペクトルから周期約 3~6 日の成分のみを取り出したもの.

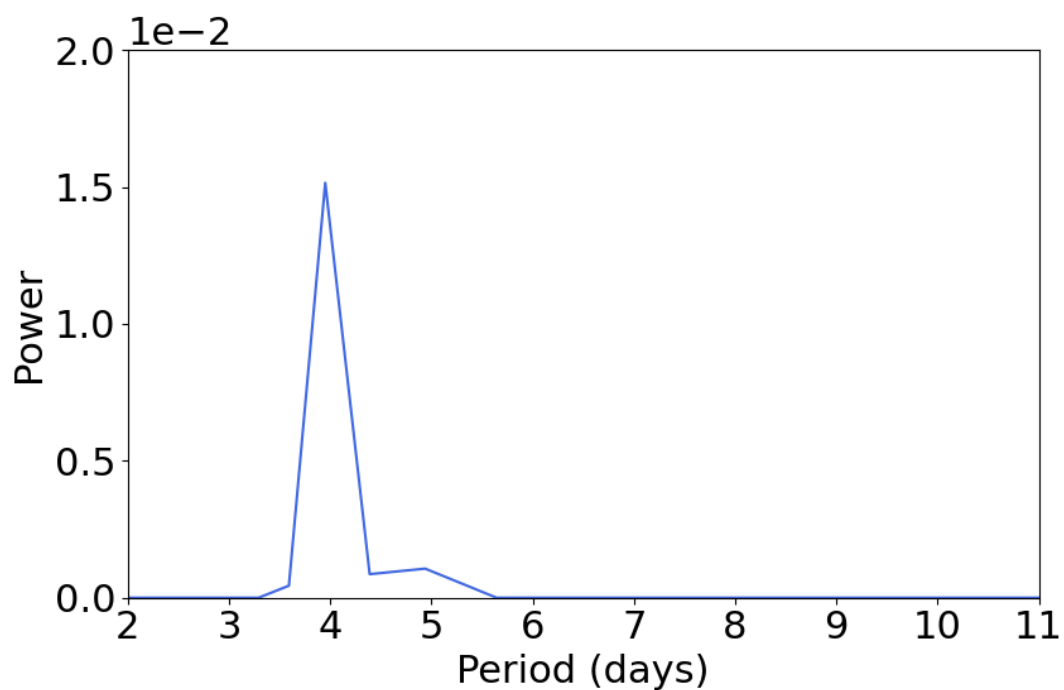


図 6.19：Period 2 の 283 nm 画像における惑星規模の輝度値 I の FFT スペクトルから周期約 3~6 日の成分のみを取り出したもの。

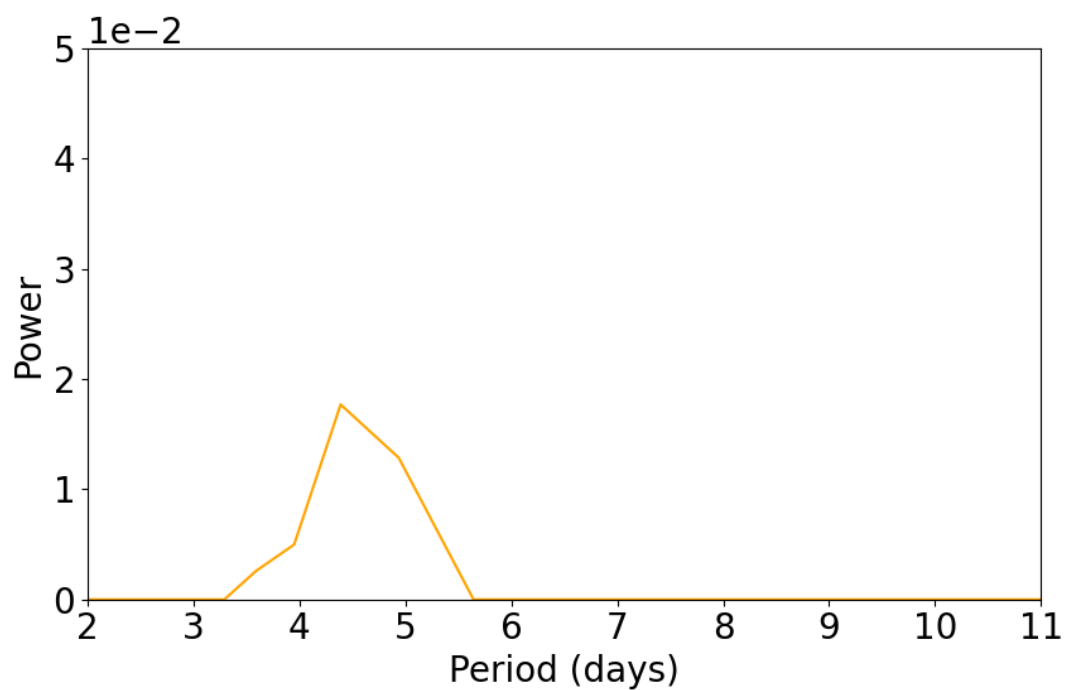


図 6.20：Period 2 の 283 nm 画像における微細構造の標準偏差 σ の FFT スペクトルから周期約 3~6 日の成分のみを取り出したもの。

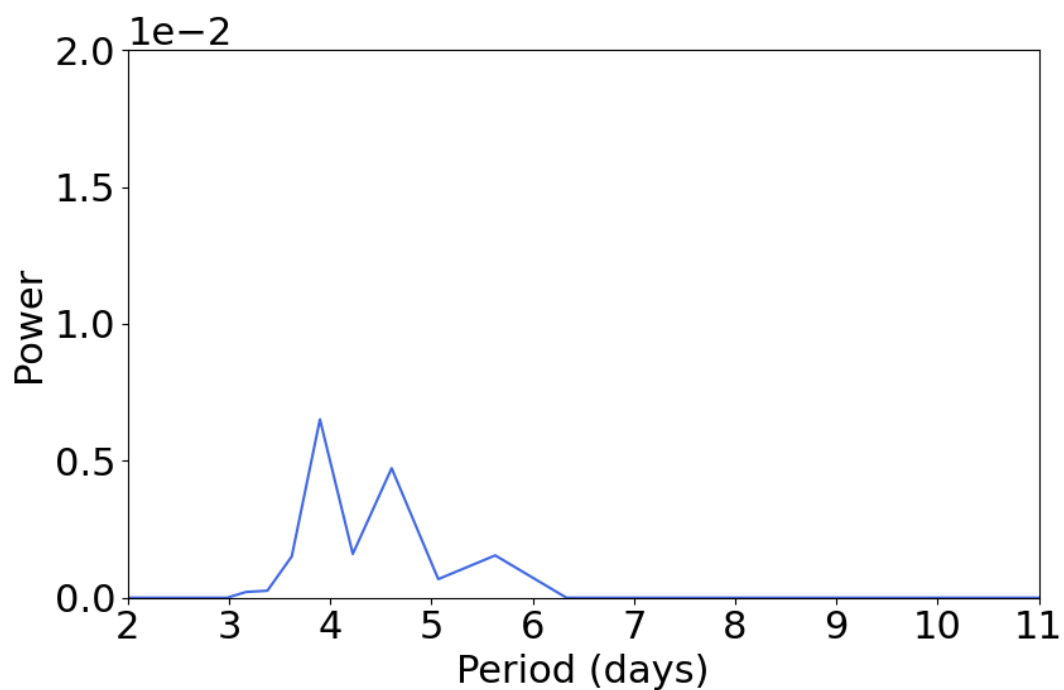


図 6.21 : Period 1 の 365 nm 画像における惑星規模の輝度値 I の FFT スペクトルから周期約 3~6 日の成分のみを取り出したもの.

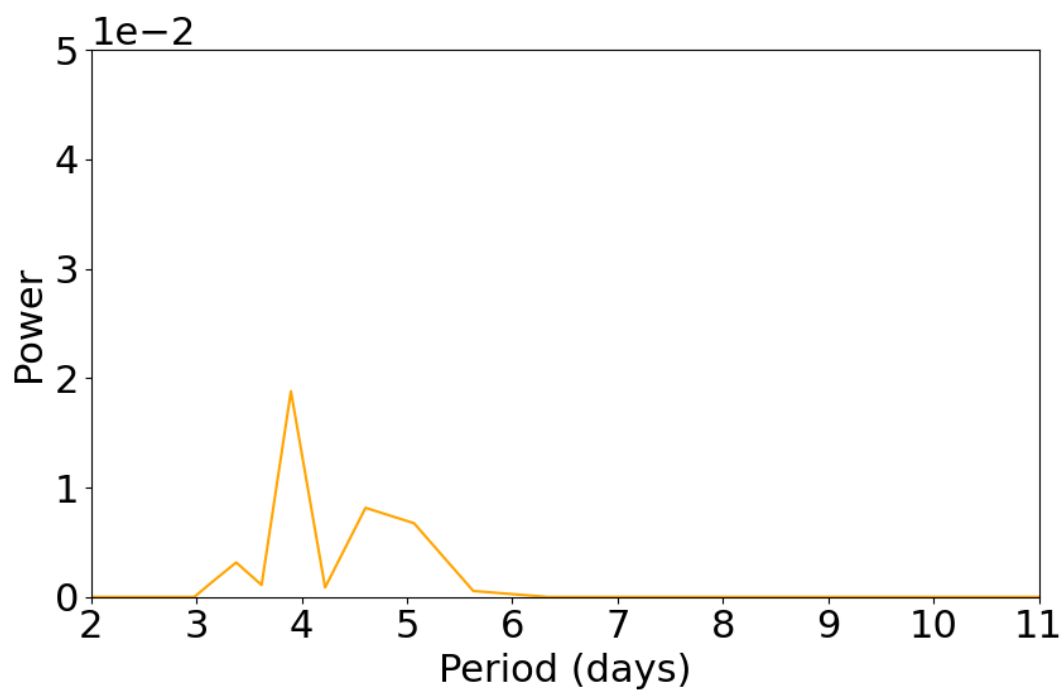


図 6.22 : Period 1 の 365 nm 画像における微細構造の標準偏差 σ の FFT スペクトルから周期約 3~6 日の成分のみを取り出したもの.

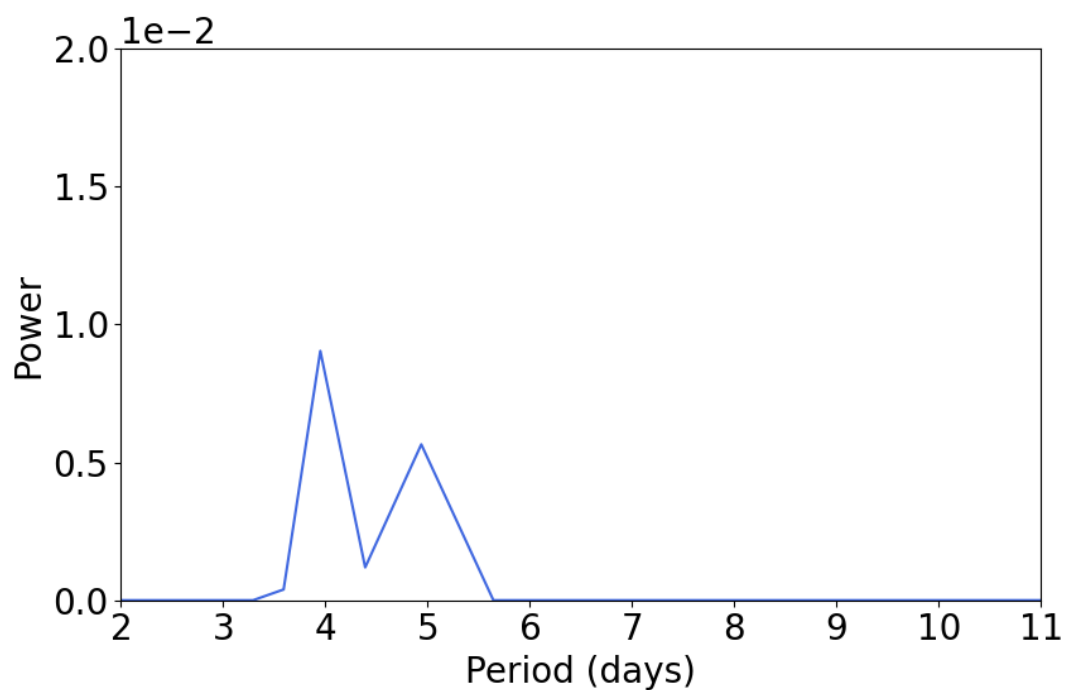


図 6.23 : Period 2 の 365 nm 画像における惑星規模の輝度値 I の FFT スペクトルから周期約 3~6 日の成分のみを取り出したもの.

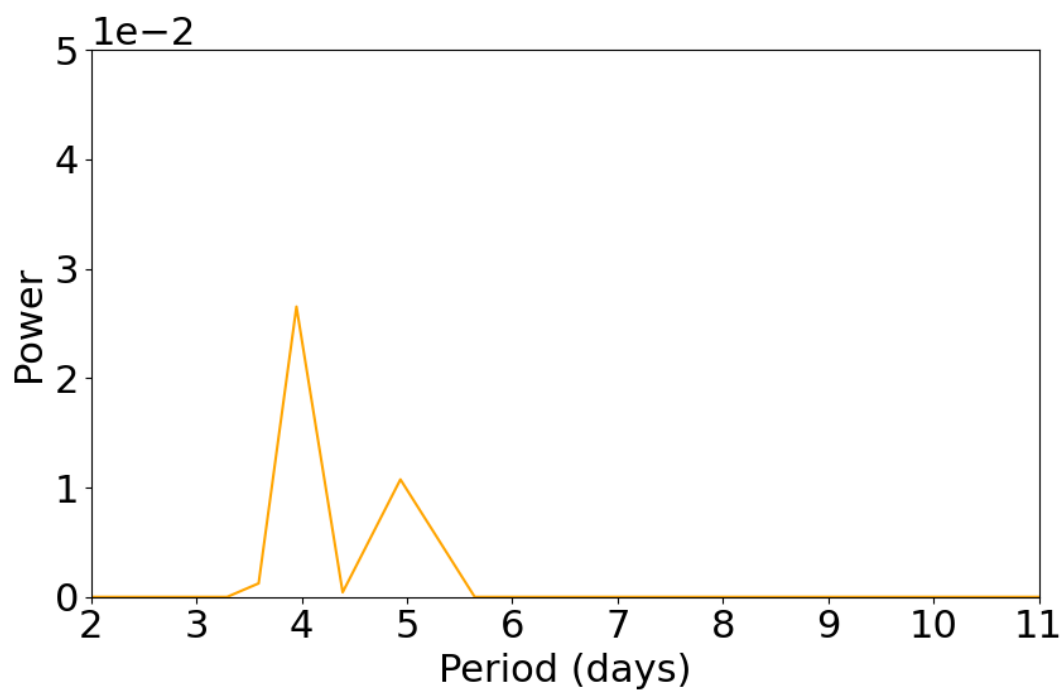


図 6.24 : Period 2 の 365 nm 画像における微細構造の標準偏差 σ の FFT スペクトルから周期約 3~6 日の成分のみを取り出したもの.

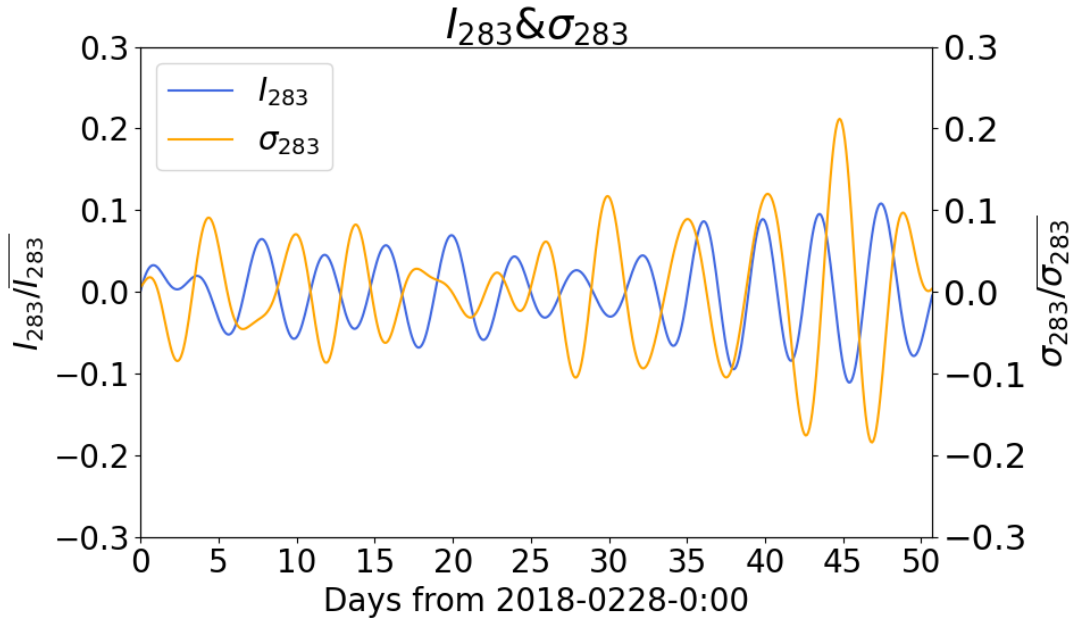


図 6.25 : Period 1 の 283 nm 画像の惑星規模の輝度値 I (青線), 微細構造の標準偏差 σ (橙色)の時系列から周期約 3~6 日の成分を取り出したもの. 横軸は日数, 縦軸はそれぞれの平均値に対する値を示している.

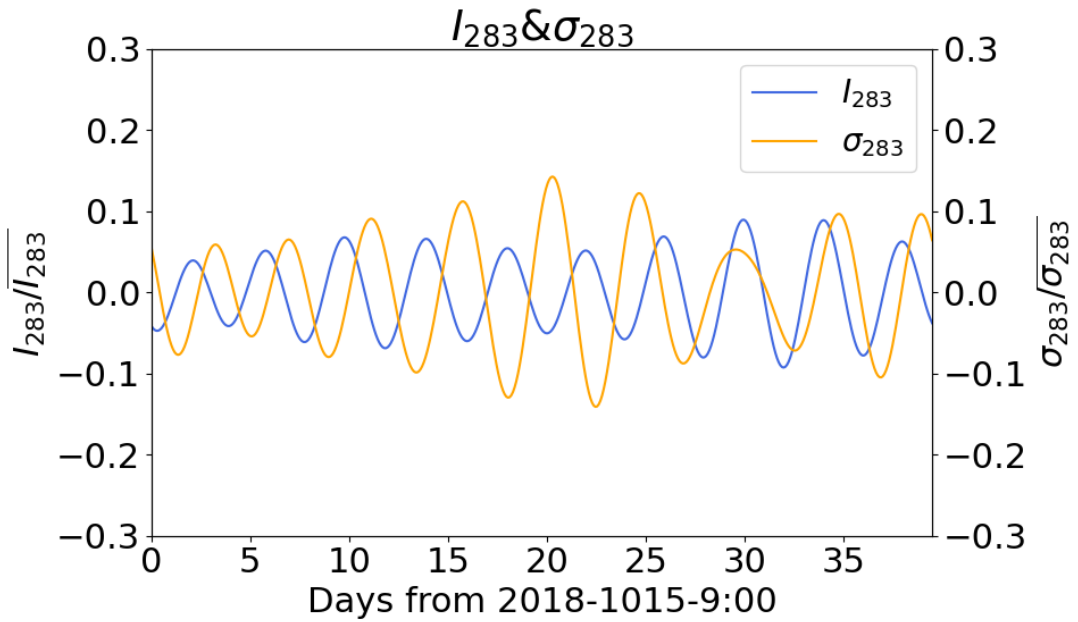


図 6.26 : Period 2 の 283 nm 画像の惑星規模の輝度値 I (青線), 微細構造の標準偏差 σ (橙色)の時系列から周期約 3~6 日の成分を取り出したもの. 見方は図 6.25 と同様.

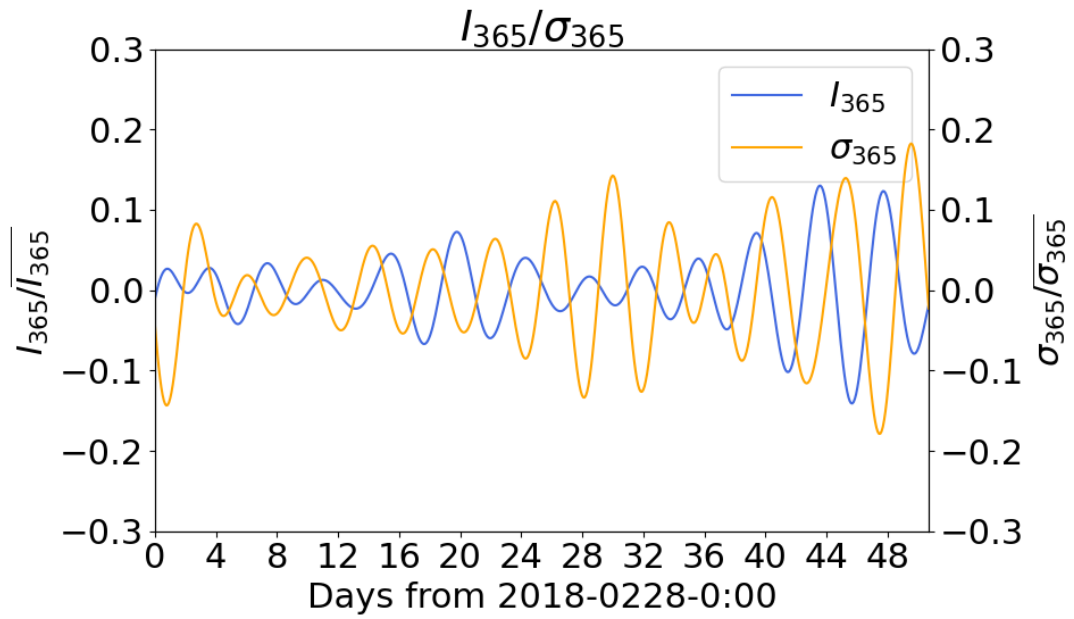


図 6.27 : Period 1 の 365 nm 画像の惑星規模の輝度値 I (青線), 微細構造の標準偏差 σ (橙色)の時系列から周期約 3~6 日の成分を取り出したもの. 見方は図 6.25 と同様.

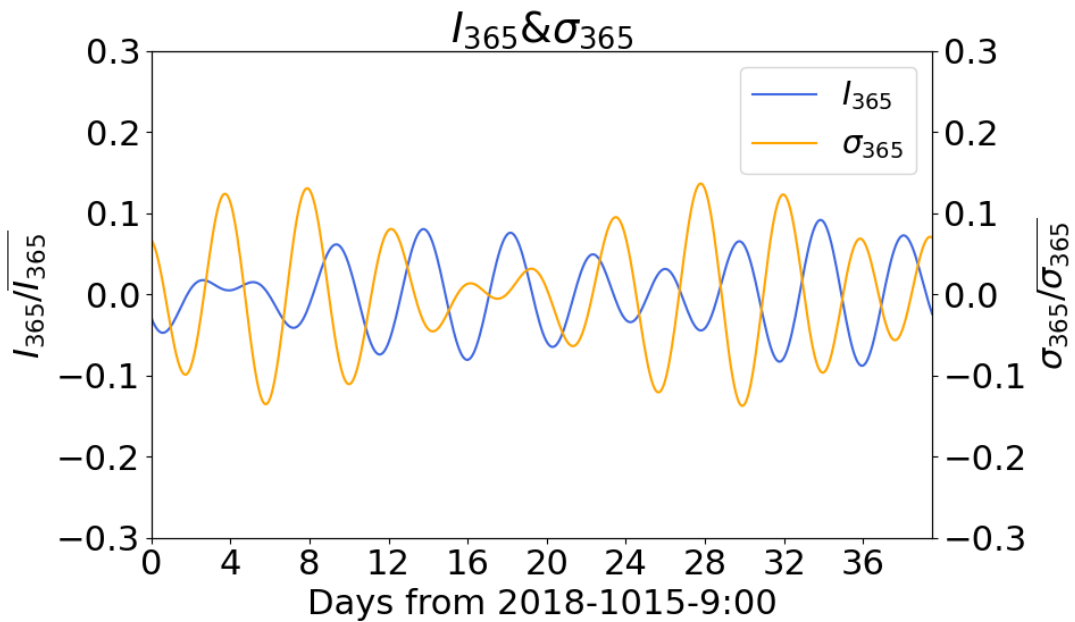


図 6.28 : Period 2 の 365 nm 画像の惑星規模の輝度値 I (青線), 微細構造の標準偏差 σ (橙色)の時系列から周期約 3~6 日の成分を取り出したもの. 見方は図 6.25 と同様.

図 6.25~6.28 の結果を見ると、どの逆 FFT の結果に関しても、背景の明るさと微細構造の振幅は平均に対して 10~20%であった。

惑星規模の輝度値と微細構造の標準偏差の関連性を定量的に評価するために、 I と σ の相関係数を調べた。表 6.2 は、約 3~6 日周期の成分を取り出して逆 FFT を行ったそれぞれのデータに対する、惑星規模の輝度値と微細構造の相関係数をまとめたものである。

	283 nm	365 nm
Period 1	-0.28	-0.54
Period 2	-0.18	-0.46

表 6.2：約 3~6 日周期の成分のみを取り出して逆 FFT を行ったデータの、惑星規模の輝度値 I と微細構造の標準偏差 σ の相関係数。

逆 FFT の結果から、背景の明るさと微細構造の変動には負の相関が見られることが分かった。また、負の相関は 283 nm よりも 365 nm のデータの方が強くなっている。負の相関が見られる原因として、惑星規模の輝度値が小さいほど紫外吸収物質の量が多いことを示しているため、紫外吸収物質が太陽光のエネルギーを吸収し対流を発達させることで微細構造の標準偏差 σ が大きくなる、といったことが考えられる。さらに、それぞれの期間の 283 nm の標準偏差 σ と 365 nm の輝度値 I の相関係数を計算すると、Period1 は-0.12, Period2 は-0.36 という負の値となった。この結果から、283 nm で観察できる微細構造と未知吸収物質は共に変化することが示唆される。

365 nm 画像の解析結果では輝度値 I と標準偏差 σ が共に 4 日周期, 5 日周期の成分を持っていた。そこで、365 nm 画像の結果により注目をし、約 3~6 日周期ではなく 4 日, 5 日周期を別々に抽出して解析を行なった。

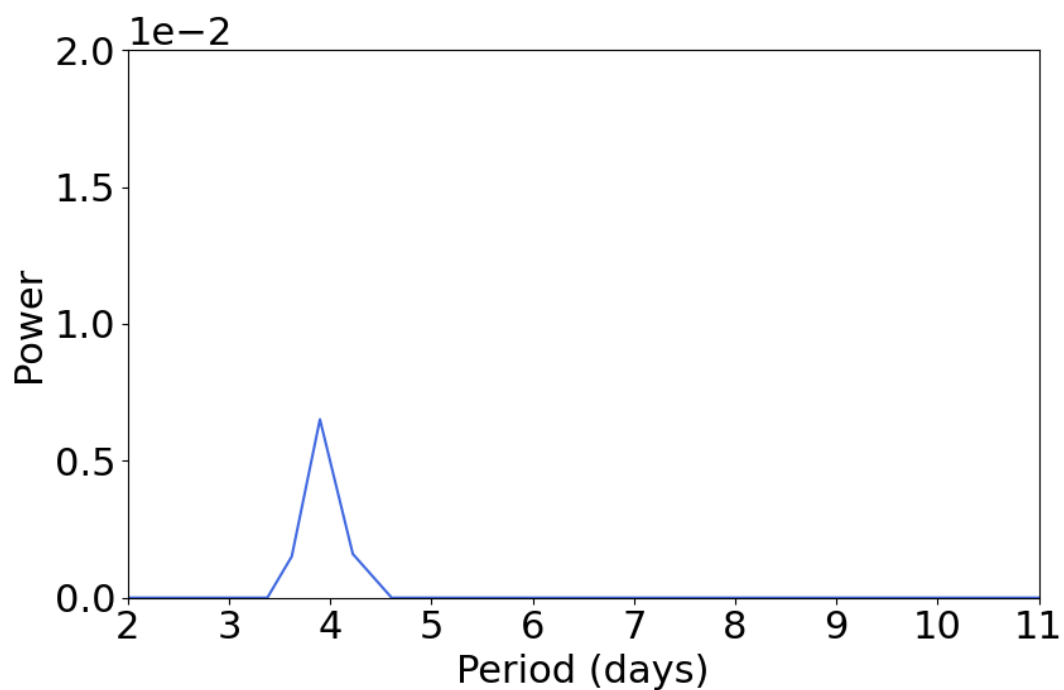


図 6.29 : Period 1 の 365 nm 画像における惑星規模の輝度値 I の FFT スペクトルから周期約 4 日の成分のみを取り出したもの.

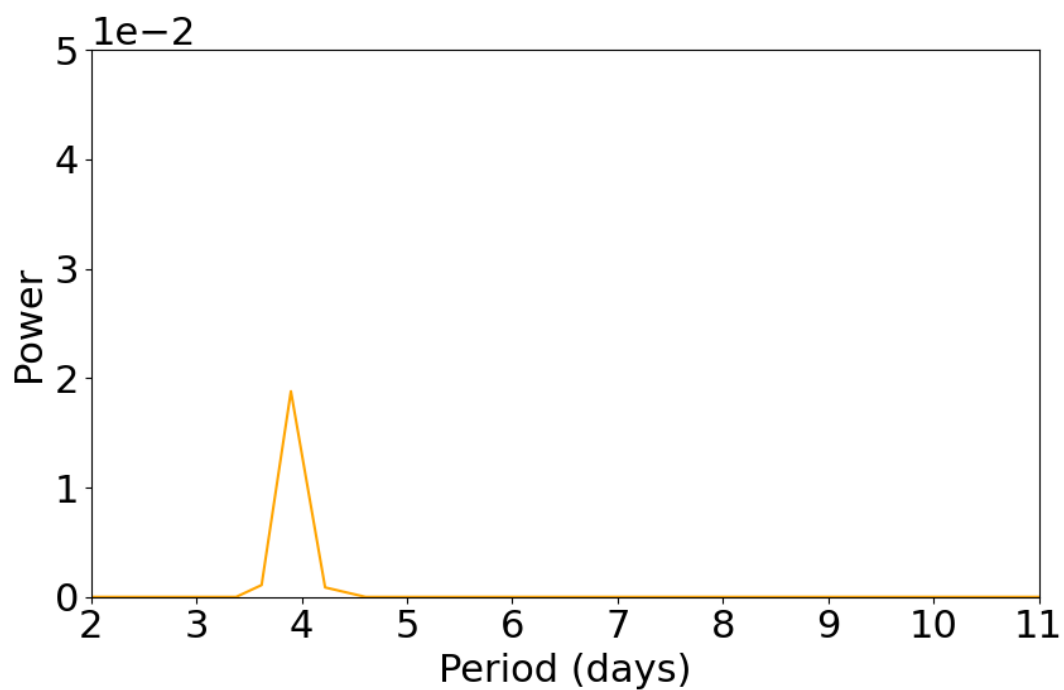


図 6.30 : Period 1 の 365 nm 画像における微細構造の標準偏差 σ の FFT スペクトルから周期約 4 日の成分のみを取り出したもの.

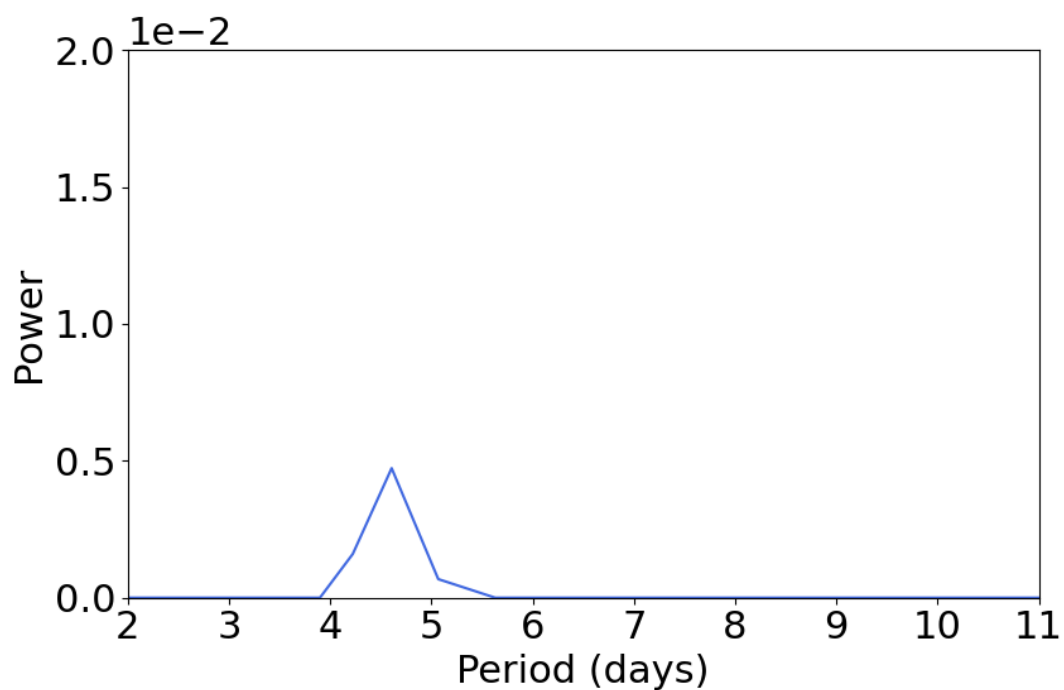


図 6.31 : Period 1 の 365 nm 画像における惑星規模の輝度値 I の FFT スペクトルから周期約 5 日の成分のみを取り出したもの.

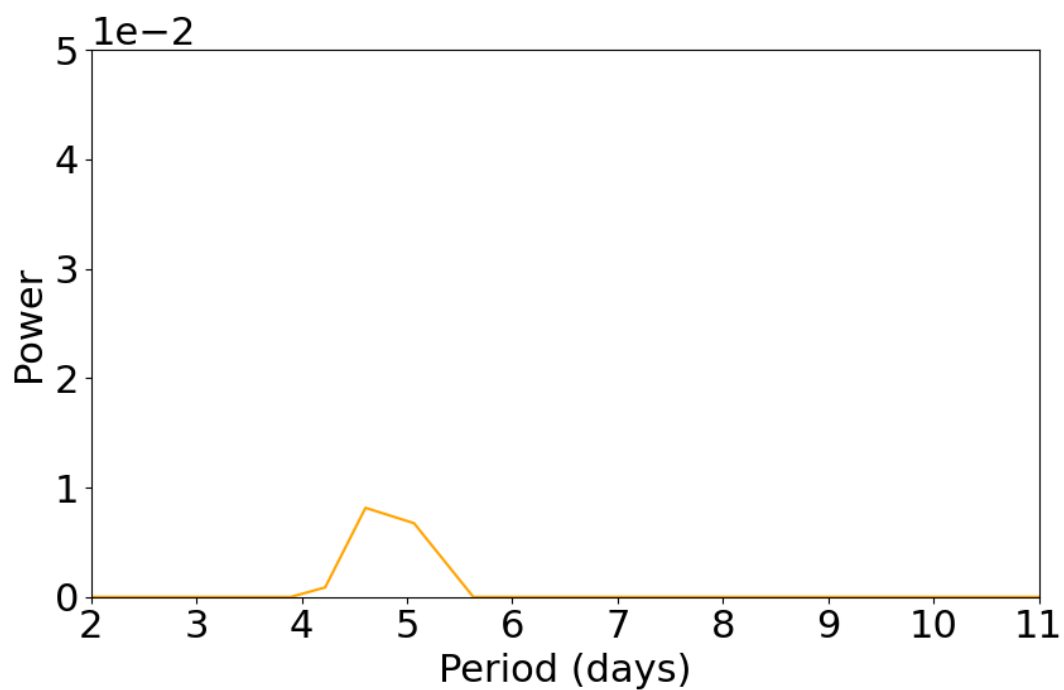


図 6.32 : Period 1 の 365 nm 画像における微細構造の標準偏差 σ の FFT スペクトルから周期約 5 日の成分のみを取り出したもの.

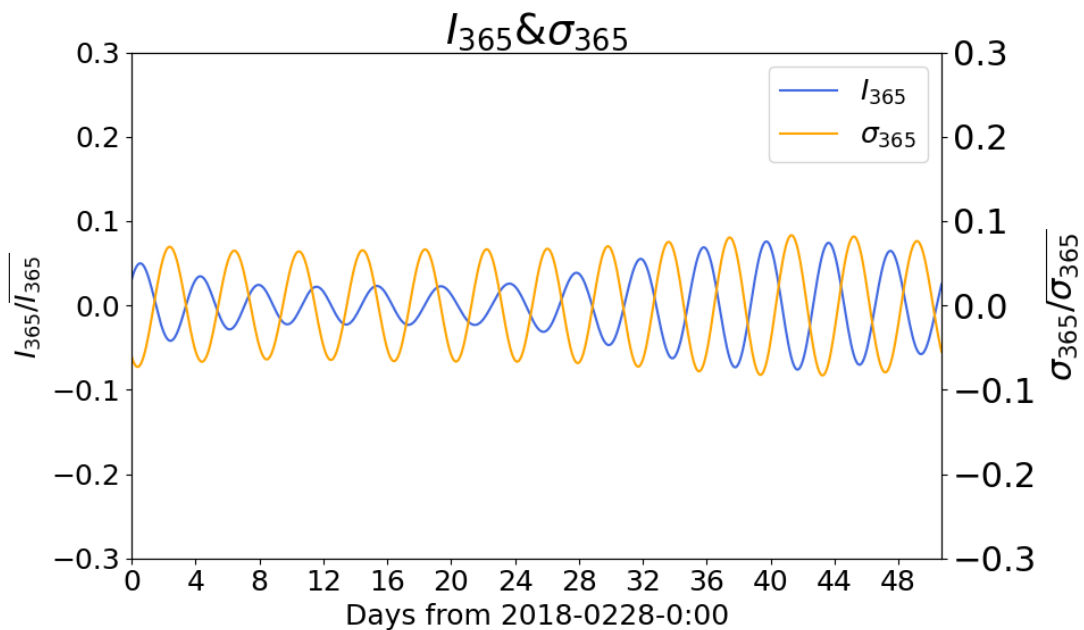


図 6.33 : Period 1 の 365 nm 画像の惑星規模の輝度値 I (青線), 微細構造の標準偏差 σ (橙色)の時系列から周期約 4 日の成分を取り出したもの. 見方は図 6.25 と同様.

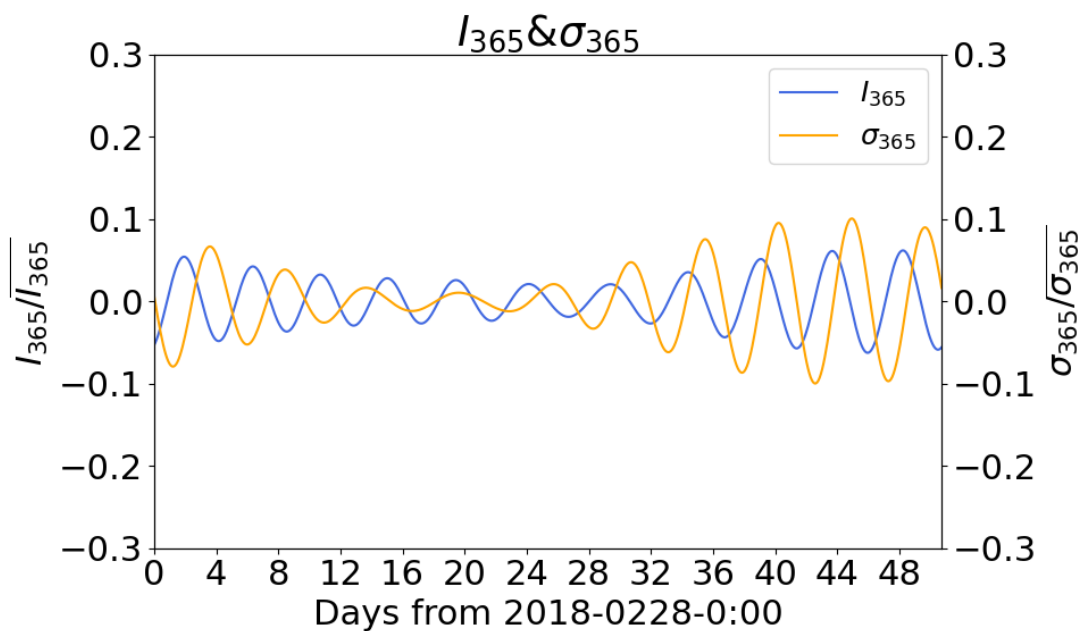


図 6.34 : Period 1 の 365 nm 画像の惑星規模の輝度値 I (青線), 微細構造の標準偏差 σ (橙色)の時系列から周期約 5 日の成分を取り出したもの. 見方は図 6.25 と同様.

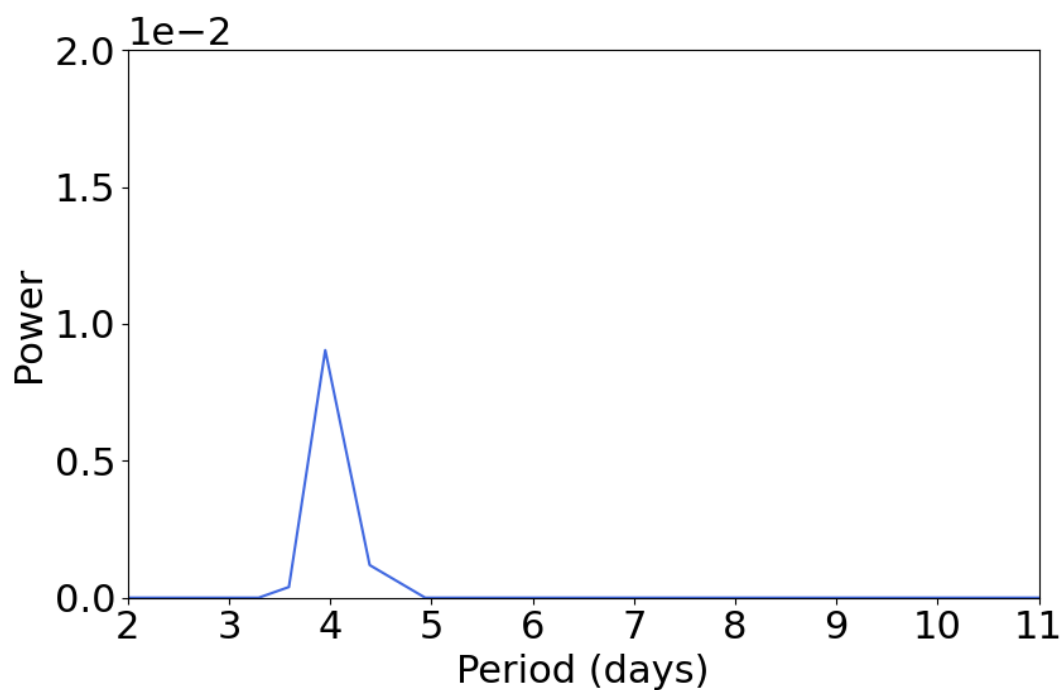


図 6.35 : Period 2 の 365 nm 画像における惑星規模の輝度値 I の FFT スペクトルから周期約 4 日の成分のみを取り出したもの.

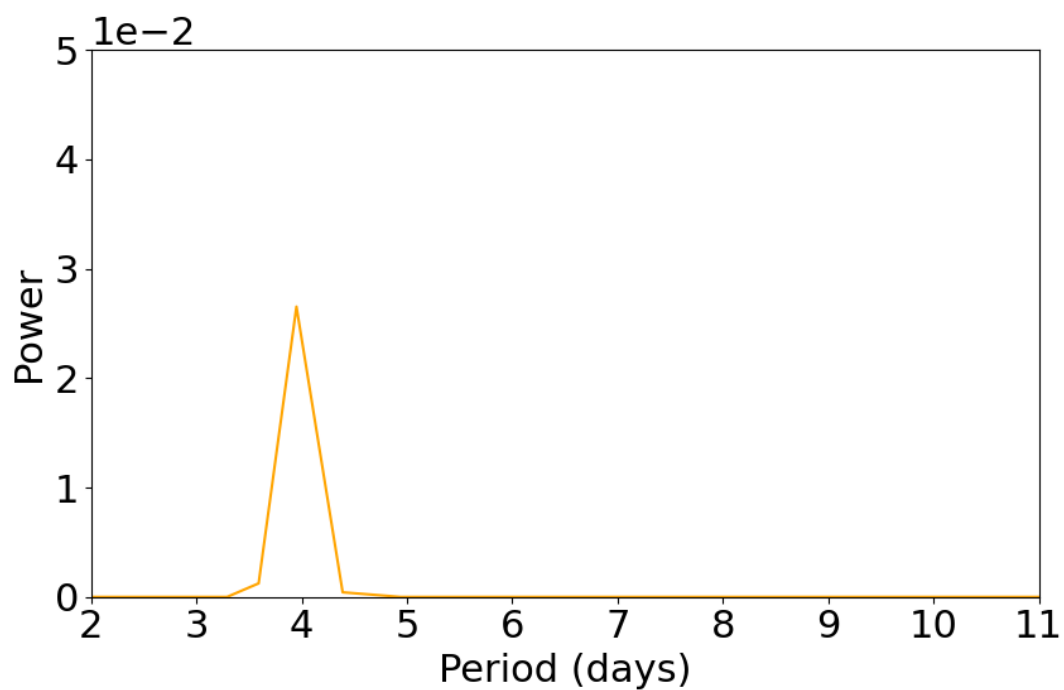


図 6.36 : Period 2 の 365 nm 画像における微細構造の標準偏差 σ の FFT スペクトルから周期約 4 日の成分のみを取り出したもの.

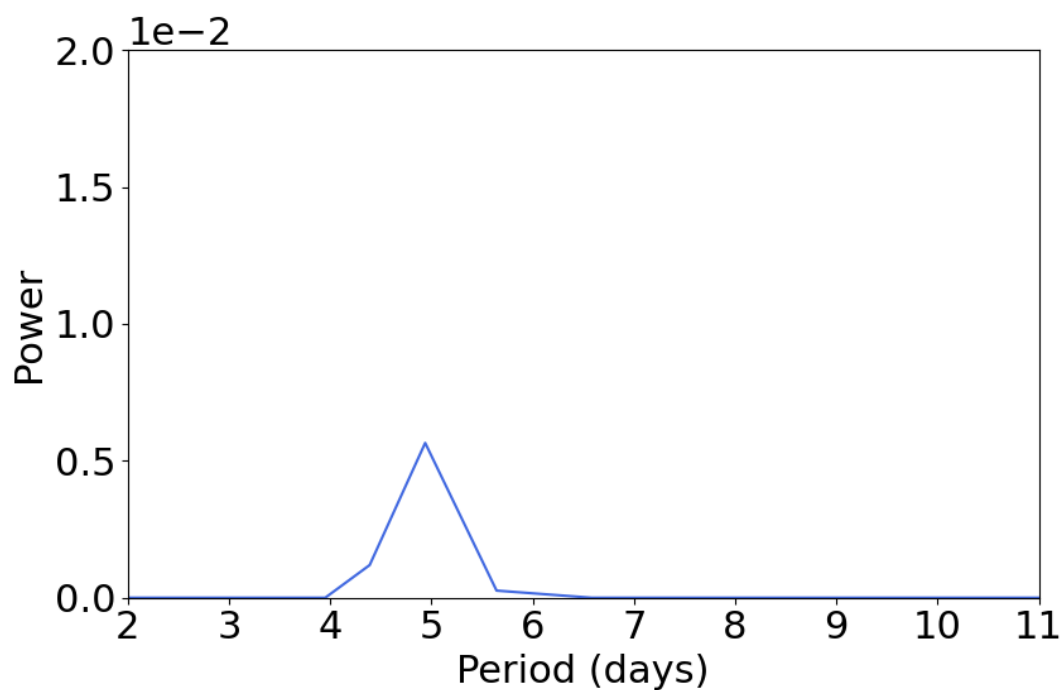


図 6.37 : Period 2 の 365 nm 画像における惑星規模の輝度値 I の FFT スペクトルから周期約 5 日の成分のみを取り出したもの.

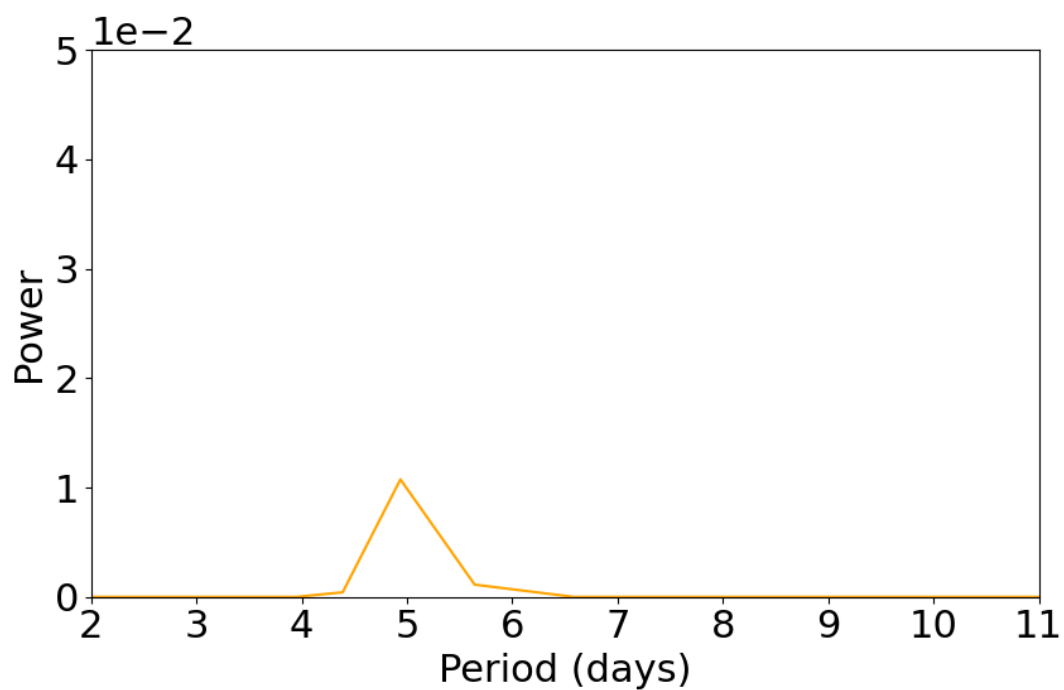


図 6.38 : Period 2 の 365 nm 画像における微細構造の標準偏差 σ の FFT スペクトルから周期約 5 日の成分のみを取り出したもの.

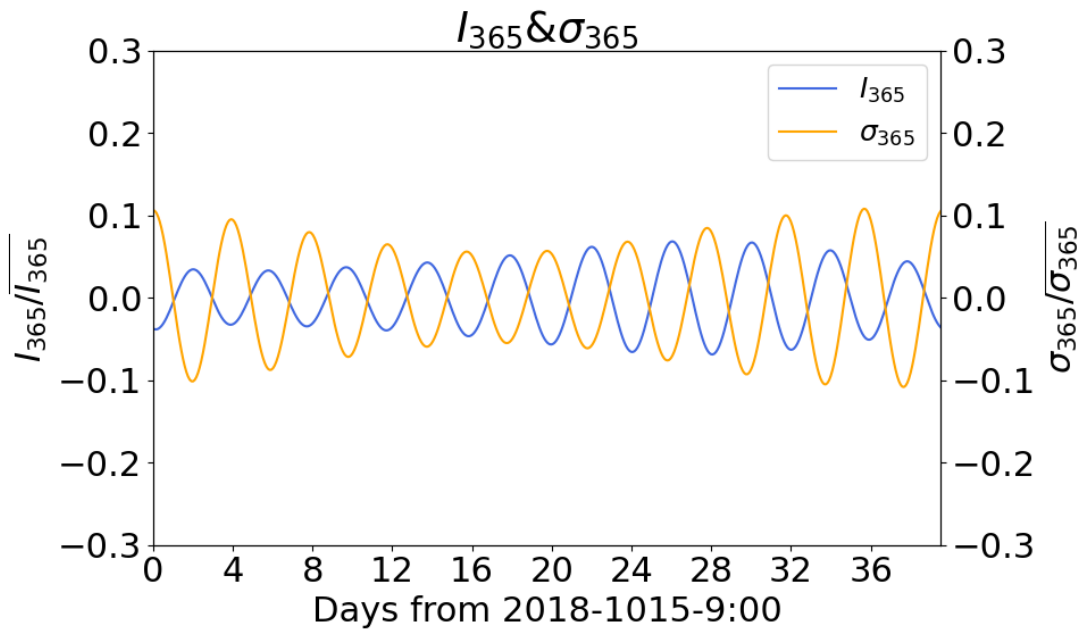


図 6.39 : Period 2 の 365 nm 画像の惑星規模の輝度値 I (青線), 微細構造の標準偏差 σ (橙色)の時系列から周期約 4 日の成分を取り出したもの. 見方は図 6.25 と同様.

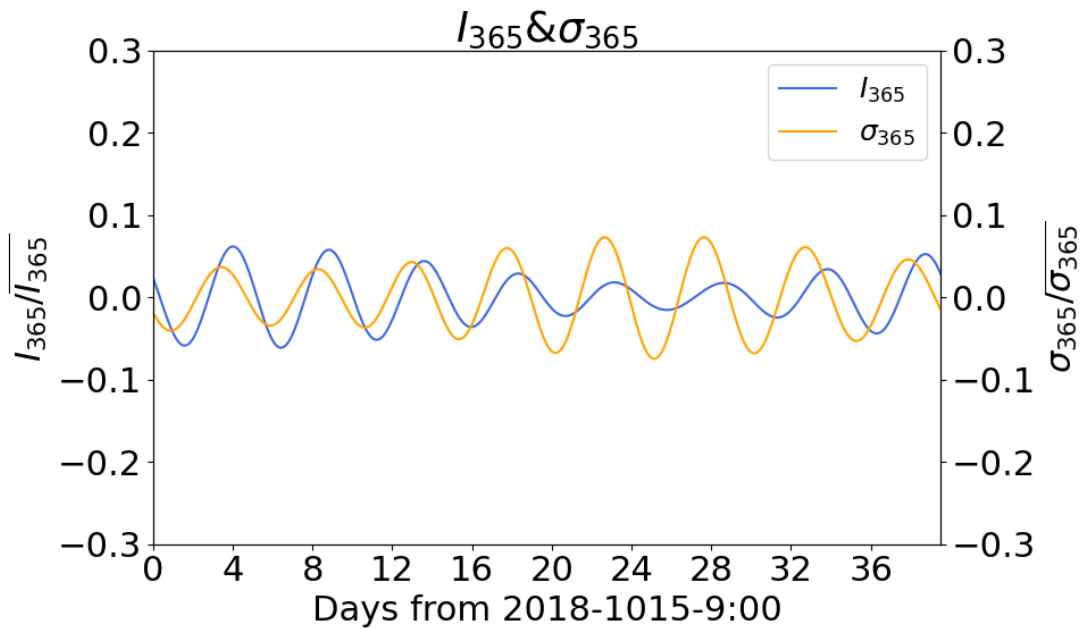


図 6.40 : Period 2 の 365 nm 画像の惑星規模の輝度値 I (青線), 微細構造の標準偏差 σ (橙色)の時系列から周期約 5 日の成分を取り出したもの. 見方は図 6.25 と同様.

表 6.3 に, 365 nm 画像の周期解析の結果から約 4 日周期や約 5 日周期の成分を取り出して逆 FFT を行ったそれぞれのデータに対する, 惑星規模の輝度値 I と微細構造の標準偏差 σ の相関係数を示す.

	4 日周期	5 日周期
Period 1	-0.74	-0.24
Period 2	-0.88	0.48

表 6.3 : 約 4 日周期や約 5 日周期の成分のみを取り出し逆 FFT を行ったデータの, 惑星規模の輝度値 I と微細構造の標準偏差 σ の相関係数.

3~6 日周期よりもさらに成分を分けて解析したところ, 約 4 日周期の成分は強い負の相関を表した. 一方で 5 日周期の成分は弱い負の相関や正の相関が見られ, 一貫した特徴は見られなかった. 約 4 日周期の惑星規模の波動は赤道域に卓越するケルビン波, 約 5 日周期の惑星規模の波動は中高緯度域に卓越するロスビー波と考えられるため, 本研究から, 微細構造とケルビン波との相関が見られたと考えられる.

また、ローカルタイム午前と午後に分けて微細構造の標準偏差の解析を行うことで、ローカルタイムによる差が生じるのかを調べた。結果を図 6.41~6.44 に示す。先行研究では、365 nm の画像で午後側の方が午前側よりも微細な構造が見えるとされていたが、標準偏差の時系列を見ると午後側の値の方が一貫して大きい、というような傾向は見られなかった。365 nm 画像の時系列では、period1, period2 共に後半で午後側の値が大きくなっているが、この傾向はもっと多くのデータを統計的に解析する必要がある。

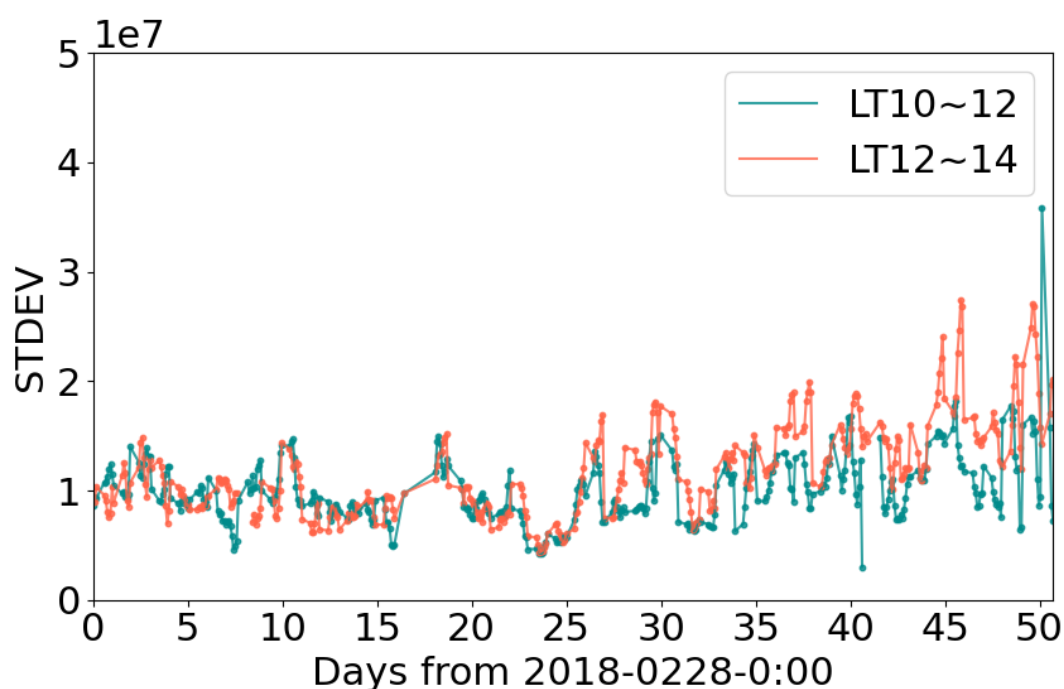


図 6.41 : Period 1 の 365 nm 画像における微細構造の標準偏差 σ の午前側(10~12 時)(緑色), 午後側(12~14 時)(赤色)の時系列.

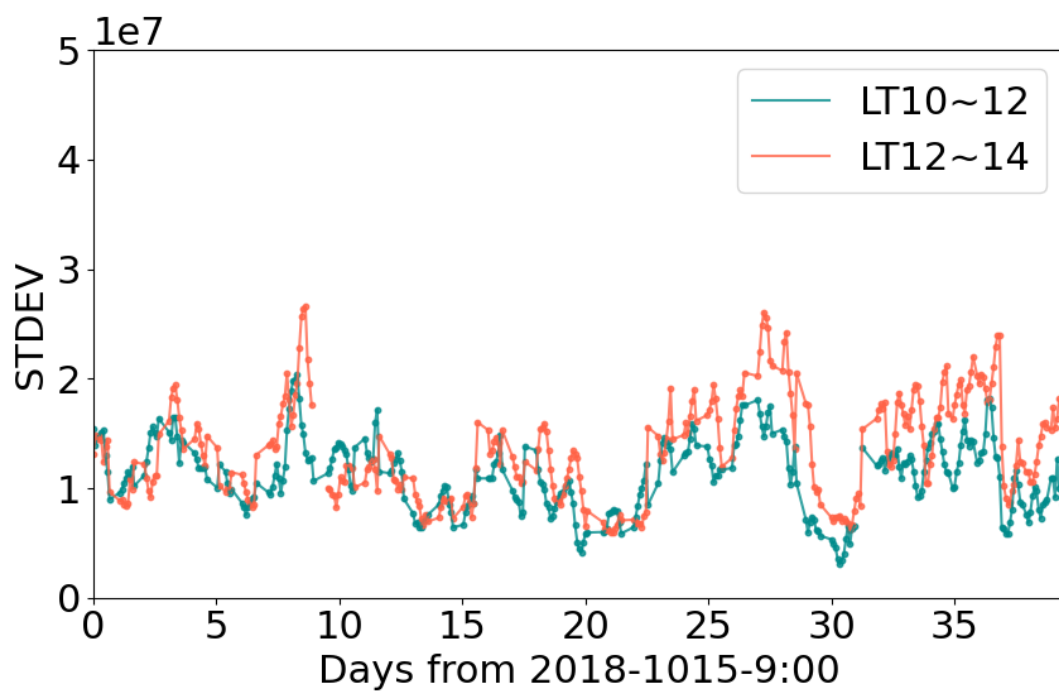


図 6.42 : Period 2 の 365 nm 画像における微細構造の標準偏差 σ の午前側(10~12 時)(緑色), 午後側(12~14 時)(赤色)の時系列.

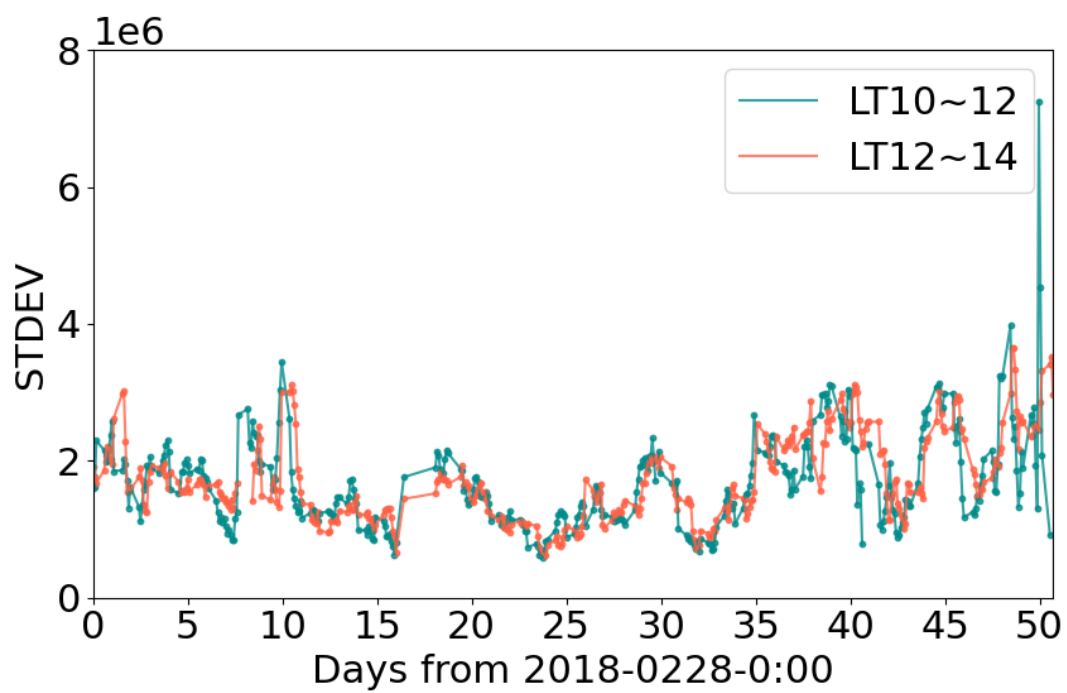


図 6.43 : Period 1 の 283 nm 画像における微細構造の標準偏差 σ の午前側(10~12 時)(緑色), 午後側(12~14 時)(赤色)の時系列.

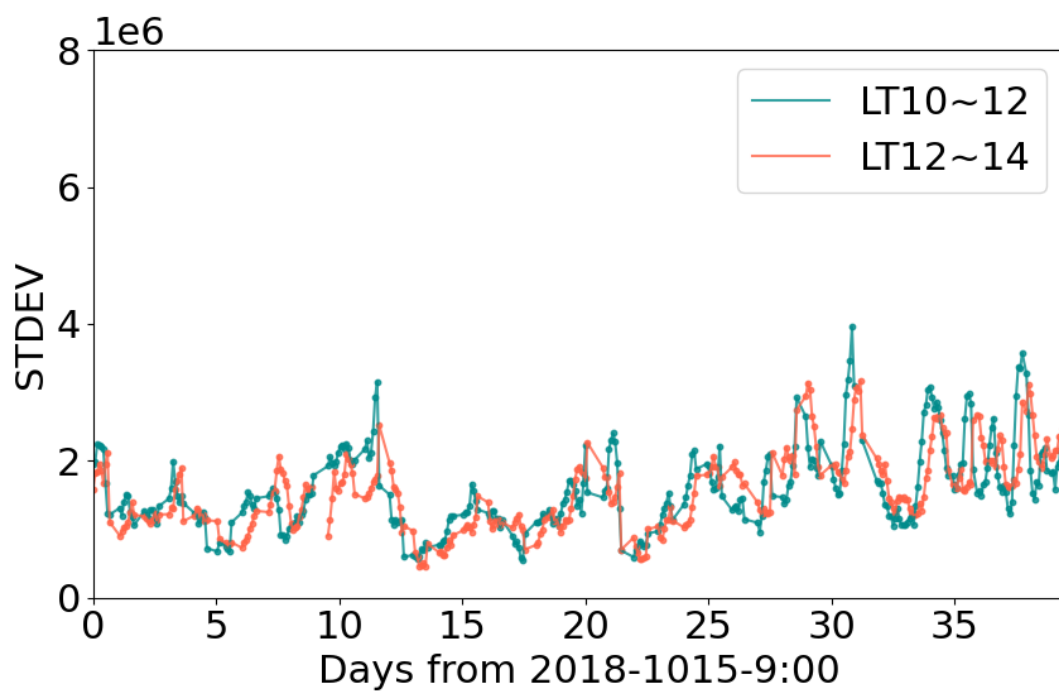


図 6.44 : Period 2 の 283 nm 画像における微細構造の標準偏差 σ の午前側(10~12 時)(緑色), 午後側(12~14 時)(赤色)の時系列.

7 まとめと考察

本研究では、金星の気象に大きく関係すると考えられる雲形態の形成プロセスを解明するため、金星を紫外波長で観察した際に低緯度付近に見られる微細な構造について解析を行った。金星探査機あかつきが撮影した画像を用いて連続的な時系列データを作成し、周期解析を行うことで、微細構造の水平スケールの特定や周期性の有無を調べた。金星大気に見られる微細な構造に注目して、スケールの特定や周期性を調べた研究は本研究が初である。

まずフラクタル解析と Wavelet 変換を用いて、雲構造が変化する特徴的なスケールを調べた。解析には 283 nm, 365 nm の紫外波長で撮影された画像と 2.02 μm の赤外波長で撮影された画像を用いた。283 nm 波長の画像では主に高度約 65 km 付近に存在するとされる SO_2 の水平分布を観測できる。365 nm 波長で観測できる物質は可視光領域まで吸収すると考えられているため、太陽光のエネルギー吸収に大きく寄与するが未だ同定されておらず、2.02 μm 波長では雲頂の CO_2 の量を観測できる。Wavelet 変換では波長にして約 800~1600 km の波の成分がピークを持ち、それよりも波長が小さい波はあまり有意な成分は見られなかった。フラクタル解析では 500~1000 km 程度のスケールで構造の変化が生じる可能性が示唆された。以上の 2 つの解析より、約 1000 km 程度のスケールまでは対流によると考えられるランダムな構造が卓越し、それ以上のスケールになると準周期的なスケールが卓越することが示唆された。

次に、以上の解析から見積もられた特徴的なスケールを元に、撮影された画像から微細構造を取り出して周期解析を行った。この解析では 283 nm 画像と 365 nm 画像を用いた。結果として、微細な構造は周期 4 日~5 日に変動していることが判明した。特に、365 nm 画像の結果では、惑星規模の輝度値 I と微細構造の標準偏差 σ に 4 日や 5 日周期の共通のピークが見られた。また、365 nm 画像では、午後側の方が、構造が複雑になるという先行研究もあるが、ローカルタイム別の微細構造の特徴の差というものはあまり見られなかった。365 nm 画像の時系列では、period1, period2 共に後半で午後側の値が大きくなっているが、この傾向はもっと多くのデータを統計的に解析する必要がある。これより、微細構造はローカルタイムに依る差よりも 4~5 日周期で変動する成分の方が卓越することが示唆される。

さらに、それぞれの 4~5 日周期の成分のみに注目をして惑星規模の変動と微細な構造の関連性を調べた。その結果、惑星規模の変動と微細構造の変動は負の相関があることが分かった。負の相関は 365 nm 画像の方が大きくなった。365 nm 画像の場合はさらに 4 日, 5 日周期を別々に抽出して解析を行った。その結果、4 日周期の成分で惑星規模の輝度値 I と微細構造の標準偏差 σ に強い負の相関

が見られた。

負の相関が意味するところは、惑星規模の輝度値が相対的に小さくなる際に、微細構造の指標である標準偏差の値は大きくなるということである。惑星規模の輝度値が小さいということは吸収物質の量が多いことを示している。特に、

365 nm 画像が観察している吸収物質は可視光線まで吸収すると考えられているため、この波長で暗く見えるときは雲層の太陽光エネルギーの吸収が大きいと思われる。したがって、微細な構造を作っていると考えられる対流は、太陽光のエネルギーによって生じることが示唆される。4 日周期で卓越する波動は主に鉛直風の振動を伴うと考えられている[Yamamoto and Tanaka 1997]。そのため、365 nm 画像で惑星規模 I の輝度値と微細構造の標準偏差 σ について、4 日周期の成分に大きな負の相関が見られたことは、雲層上層へ吸収物質が多く運ばれ太陽光のエネルギーを吸収することで対流が生じ、微細構造が発達することを示唆している。

本研究では、地球上で見られるような惑星スケールの波動と小規模な対流活動が同期したものを金星で発見し、解析を行った。このような同期を地球以外の惑星で発見したのは初であり、惑星間の気象の体系化に繋がることが期待できる。

今後の課題として、紫外画像の雲追跡を行うことにより風速場を計算することができるため、今回使用した画像が撮影された時間の風速場と、本研究の結果を比較することで、微細な構造の変動とともに低緯度付近の風向きがどのように変化するかを調べることができる。風速の変動から惑星スケールの波動の位相がわかるため、微細構造の変動が波動の位相とどのような関係にあるのかを調べることができる。風速場との比較を通して微細な雲構造の変動と惑星規模の波動との関係をより解明できることが期待できる。また、このような研究を通して、金星大気に存在する紫外線の未知吸収物質の同定につながることも期待できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，多大なるご指導を賜りました指導教官の今村剛教授に深く感謝いたします．惑星科学の基礎から研究の進め方に至るまで，いつも懇切丁寧に根気強くご指導下さり，誠にありがとうございました．あかつきチームの皆様にはデータのみならず，折に触れて，研究を進める上で非常に有益なご助言をいただきました．特に，位相角依存性のデータを提供してくださったLee Yeon Joo博士に感謝を申し上げます．理学系研究科の神野拓哉氏には，フラクタル次元の解釈にあたり共に議論をしていただき，様々なご助言を頂きました．

アストロバイオグループの吉川先生と吉岡先生には，セミナー発表の度に貴重なご意見を賜りました．今村研究室の先輩の千葉翔太氏，同期の岩中達郎氏，櫻井龍太郎氏には，研究を進めるにあたっての些細な疑問から研究内容の議論まで，いつも丁寧に答えていただきありがとうございました．また，アストロバイオグループの皆様には日頃から研究への励みをいただき，本当にお世話になりました．この場を借りて深く感謝申し上げます．

最後に，私の意見を尊重し，ここまで私をずっと支えてくださった家族に感謝いたします．

参考文献

Belton, J. S., Smith G. R., Schubert, G., Del Genio, A. D. (1976) Cloud Patterns, Waves and Convection in the Venus Atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences* 33, 1394-1417.

Del Genio, A. D., Rossow, W. B. (1990) Planetary-Scale Waves and the Cyclic Nature of Cloud Top Dynamics on Venus. *Journal of the Atmospheric Sciences* 47, 293-318.

Na, C. Y., and Esposito, L. W. (1997) Is Disulfur Monoxide a Second Absorber on Venus? *Icarus* 125, 364-368.

Imai, M., Kouyama, T., Takahashi, Y., Yamazaki, A., Watanabe, S., Yamada, M., Imamura, T., Satoh, T., Nakamura, M., Murakami, S., Ogohara, K., Horinouchi, T. (2019) Planetary-Scale Variations in Winds and UV Brightness at the Venusian Cloud Top: Periodicity and Temporal Evolution. *Journal of Geographic Research: Planets* 124, 2635-2659

Kouyama, T., Imamura, T., Namamura, M., Satoh, T., Futaana, Y. (2013) Long-term variation in the cloud-tracked zonal velocities at the cloud top of Venus deduced from Venus Express VMC images. *Journal of Geographic Research: Planets* 118, 37-46.

Kouyama, T., Imamura, T., Nakamura, M., Satoh, T., Futaana, Y. (2015) Vertical propagation of planetary-scale waves in variable background winds in the upper cloud region of Venus. *Icarus* 248, 560-568.

Lee, Y. J., Imamura, T., Schröder, E. S., Marcq, E. (2015) Long-term variations of the UV contrast on Venus observed by the Venus Monitoring Camera on board Venus Express. *Icarus* 253, 1-15.

Lee, Y. J., Yamazaki, A., Imamura, T., Yamada, M., Watanabe, S., Sato M. T., Ogohara, K., Hashimoto, G. L., Murakami, S. (2017) Scattering Properties of the Venusian Clouds Observed by the UV Imager on board Akatsuki. *The Astronomical Journal*, 154:44.

Lee, Y. J., et al. (2019) Long-term Variations of Venus's 365 nm Albedo Observed by Venus Express Akatsuki, MESSENGER, and the Hubble space Telescope. *The Astronomical Journal*, 158:126.

Lovejoy, S. (1982) Area-Perimeter Relation for Rain and Cloud Areas. *Science* 216, 185-187.

Markiewicz, J. W., Titov, D. V., Limaye, S. S., Keller, U. H., Ignatiev, N., Jaumann, R., Thomas, N., Michalik, H., Moissl, R., Russo, P. (2007) Morphology and dynamics of the upper cloud layer of Venus. *Nature*, 450:29.

Mills, F. P., Esposito, L. W., Yung, Y. L. (2007) Atmospheric Composition, Chemistry, and Clouds. *Exploring Venus as a Terrestrial Planet* 176, 73-100.

Nakagawa, M. (2010) On the Fractal Structure Analyses of Human Skins. 39 (11) 539-546.

Nakamura, H., Sone, M., Takagi, M. (1986) Texture Analysis of Meteorological Image by Fractal Dimension and Lower Order Statistics. 情報処理学会研究報告 コンピュータビジョンとイメージメディア 1986(59), 1-8.

Nakamura, M., et al. (2011) Overview of Venus orbiter, Akatsuki. *Earth, Planets and Space* 63, 443-457.

Nakamura, M., et al. (2016) AKATSUKI returns to Venus. *Earth, Planets and Space*, 68:75.

Peralta, J., Hueso, R., Sánchez-Lavega, A. (2007) Cloud brightness distribution and turbulence in Venus using Galileo violet images. *Icarus* 188, 305-314.

Rossow, W. B., Del Genio, A. D., Limaye, S. S., Travis, L. D. (1980) Cloud Morphology and Motions From Pioneer Venus Images. *Journal of Geophysical Research* 85, 8107-8128.

Sánchez-Lavega, A., Lebonnois, S., Imamura, T., Read, P., Luz, D. (2017) The Atmospheric Dynamics of Venus. *Space Science Reviews* 212, 1541-1616.

Sato, M, T., Satoh, T., Sagawa, H., Manago, N., Lee, Y. J., Murakami, S., Hashimoto, G. L., Kasaba, Y., Yamazaki, A., Yamada, M., Watanabe, S., Imamura, T., Nakamura, M. (2020) Dayside cloud top structure of Venus retrieved from Akatsuki IR2 observations. *Icarus* 345, 113682.

Satoh, T., Nakamura, M., Ueno, M., Uemizu, K., Suzuki, M., Imamura, T., Kasaba, Y., Yoshida, S., Kimata, M. (2016) Development and in-flight calibration of IR2: 2- μ m camera onboard Japan's Venus orbiter Akatsuki. *Earth, Planets and Space*, 68:74.

Satoh, T., et al. (2017) Performance of Akatsuki/IR2 in Venus orbit: the first year. *Earth, Planets and Space*, 69:154.

Scarlge, J. D. (1982) Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical Aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophysical Journal* 263, 83.

Seiff, A., Schofield, J. T., Kliore, A. J., Taylor, F. W., Limaye, S. S., Revercomb, H. E., Sromovsky, L. A., Kerzhanovich, V. V., Moroz, V. I., Marov, M. Ya. (1985) Models of the structure of the atmosphere of Venus from the surface to 100 kilometers altitude. *Advances in Space Research* 5(11), 3-58.

Titov, D.V. et al (2012) Morphology of the cloud tops as observed by the Venus Express Monitoring Camera. *Icarus* 217, 682-701.

Titov, D.V., Ignatiev, N. I., McGouldrick, K., Wilquet, V., Wilson, F. Colin. (2018) Clouds and Hazes of Venus. *Space Science Reviews*, 214:126.

Torrence, C., and Compo, G. P. (1998) A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79:1.

Weber, N. J., Kim, D., Mass, C. F. (2021) Convection-Kelvin Wave Coupling in a Global Convection-Permitting Model. *Journal of the Atmospheric sciences* 78, 1039-1055.

Yamamoto, M., and Tanaka, H. (1997) Formation and Maintain of the 4-Day Circulation in the Venus. *Journal of the Atmospheric Sciences* 54, 1472-1489.

Yamazaki et al. (2018) Ultraviolet imager on Venus orbiter Akatsuki and its initial results. *Earth, Planets and Space*, 70:23

Ynug, Y. L., and Demore, W. B. (1982) Photochemistry of the Stratosphere of Venus: Implications for atmospheric Evolution. *Icarus* 51, 199-247.