

東京大学大学院新領域創成科学研究科
複雑理工学専攻

平成 30 年度

修士論文

金星からの熱赤外放射の周期解析
(Periodicity analysis of thermal infrared radiation
from Venus)

2019 年 3 月 8 日提出

指導教員 今村 剛 教授

梶原 直也

目次

1. 緒言	1
1. 1 研究背景.....	1
1. 2 研究目的.....	7
2. 観測データ	8
3. 輝度温度勾配の変動	11
3. 1 輝度温度勾配に注目する理由.....	11
3. 2 出射角依存性.....	12
3. 3 輝度温度勾配の導出手順.....	13
4. Fourier 解析	27
4. 1 解析手順.....	27
4. 2 結果.....	37
4. 3 探査機の軌道運動の影響.....	47
4. 4 振幅と位相の緯度構造	48
5. Wavelet 解析	53
5. 1 短時間 Fourier 変換と wavelet 変換.....	53
5. 2 解析方法.....	53
5. 3 解析結果および考察.....	55
6. 結言	58
謝辞.....	60
参考文献.....	61

1. 緒言

1.1 研究背景

金星は大きさ、質量などが地球のそれと似通っている太陽系第2惑星である。金星と地球は似ている部分が多いものの環境はかなり異なる様相を呈している。金星の大気圧は約90気圧であり大気の主成分は二酸化炭素である。その温室効果のために地表面温度は約460°Cという非常に高温に達する。また金星の自転周期は約243日であり地球と比べて非常にゆっくりと自転していることが分かる。このような遅い自転速度にも関わらず、図1.1からもわかるように、上層大気は全球で自転を追い越す方向に毎秒100m(自転の約60倍)の速さで回転していることが知られている。この大気の大循環はスーパーローテーションとして知られており、熱潮汐波やKelvin波、Rossby波といった惑星規模の波による運動量輸送がその生成、維持に重要な役割を果たしていると考えられているが、そのプロセスは未だ解明されていない。

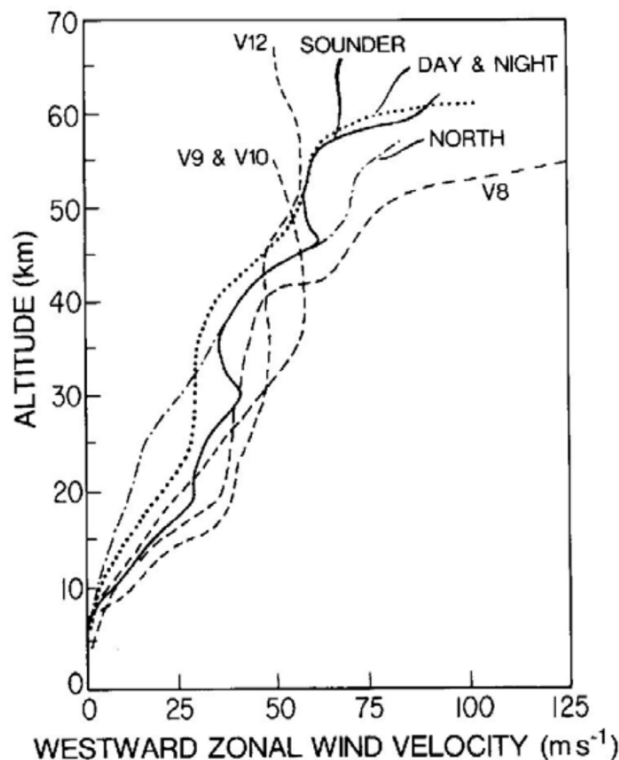


図1.1 : Pioneer VenusとVenera着陸機によって観測された金星の東西風の鉛直構造 (Schubert et al., 1980)

Rossby 波は数日以上の周期, 数千 km の波長を持つ, 本質的に水平面内の波動である. 式(1.1)に示すコリオリパラメータ f が緯度によって変化すること (β 効果)によって生じる南北方向の復元力をもとに, 自転と逆向きに伝搬する.

$$f = 2\Omega \sin\phi \quad (1.1)$$

ここで Ω は角速度, ϕ は緯度である. 金星の自転周期は 243 日であり角速度が小さいため, 金星に Rossby 波は存在しにくいだろうと考えられてきたが, 大気のスーパーローテーションが自転に似た効果を持つため, 存在する可能性がある. Rossby 波には様々なモードが存在する. その水平構造の例を図 1.2 に示す (Matsuno, 1966). 南北対称である波も非対称である波も考えられるが, いずれにしても Rossby 波は中緯度で振幅が最大になることが見て取れる.

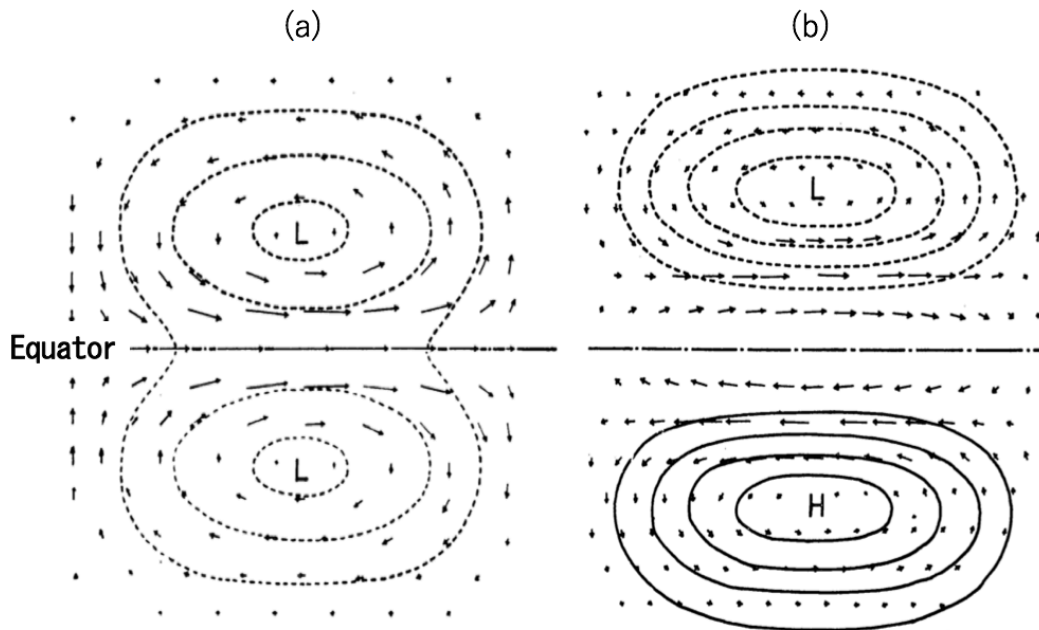


図 1.2 : Rossby 波の水平構造. (a) 第一モード, (b) 第二モード (Matsuno, 1966). 半波長ぶんだけ図示してある. ベクトルは流速, 実線は高気圧, 破線は低気圧を示している.

Kelvin 波は重力を復元力とし、自転と同じ方向に伝搬する大気重力波の一種である。惑星の自転と β 効果によって赤道域に捕捉され、図 1.3 に示した水平構造のように赤道付近に見られ、赤道上で振幅が最大となる。Kelvin 波の東西・鉛直断面は重力波としての構造を持ち、風速変動は基本的に東西風のみである。また、南北方向の力のバランスは、波がもたらす気圧偏差によって働く気圧傾度力と東西風に対して働くコリオリ力が釣りあう、地衡風バランスである。

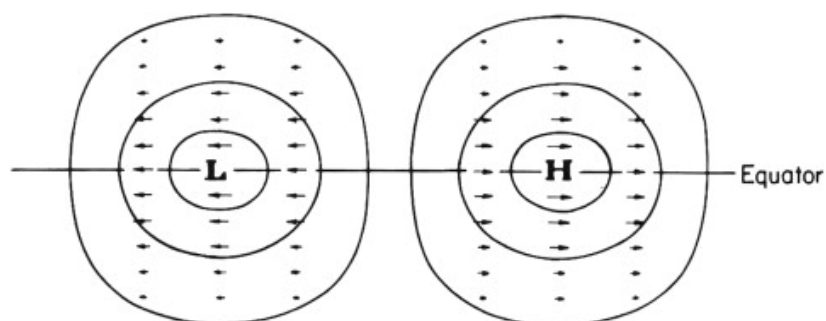


図 1.3 : Kelvin 波の水平構造の模式図 (A. K. Smith and J. Perlwitz, 2015)
等高線はジオポテンシャル, 矢印は流速を表す。

熱潮汐波は太陽加熱によって生じる惑星規模の大気重力波であり、金星においては NASA の探査機 Pioneer Venus の赤外線観測によって、温度場で初めて検出された (Taylor et al., 1980)。自転にともなって太陽直下点が変わるためその位相は太陽方向に固定されており、金星の大気大循環モデルでは図 1.4 のような水平構造を持つ (Takagi et al., 2018)。一日潮と呼ばれる東西波数 1 の波は高緯度で振幅が大きく、半日潮と呼ばれる東西波数 2 の波は中低緯度で振幅が大きくなることが知られている (Pechmann and Ingersoll, 1984)。

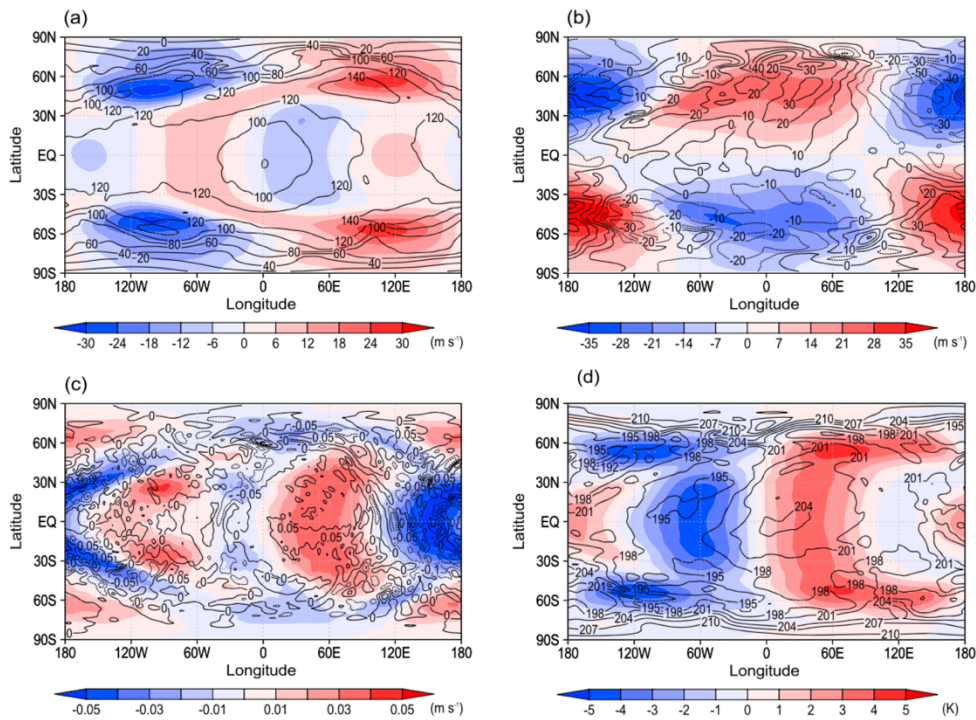


図 1.4 : 金星大気大循環モデルで計算された高度 70km における熱潮汐波の水平構造. (a)東西風速, (b) 南北風速, (c) 鉛直風速, (d) 温度偏差. どのパネルにおいても太陽直下点は図の中心である. (Takagi et al., 2018)

金星大気中の惑星規模の波動の存在は雲画像の時系列解析によって捉えられてきた. 図 1.5 に JAXA の金星探査機あかつきによって撮影された金星の画像を示す. 図 1.5a は波長 $0.90\mu\text{m}$ の近赤外光を観測したものであり, 図 1.5b は波長 283nm の紫外光を観測したものである. 金星を可視光で見ると, この近赤外面像と同様に, 特徴的な模様が見られない. しかし, 紫外波長で観測すると吸収物質の存在により濃淡模様を見ることができる. NASA の探査機 Pioneer Venus で長期間にわたって継続的に撮影された紫外画像を用いて紫外輝度の周期解析を行った結果が図 1.6 である (DelGenio & Rossow., 1990). 左上のパネルでは低緯度で約 4.0 日周期の変動が, 中高緯度で約 5.0 日周期の変動が卓越していることがわかる. 上で述べたような Kelvin 波と Rossby 波の水平構造から, 低緯度で卓越している約 4.0 日周期の変動が Kelvin 波, 中高緯度で南北対称に卓越している約 5.0 日周期の変動が Rossby 波であると想像されている. 右上のパネルでは低

緯度で約 3.8 日周期の変動が見られるが高緯度では周期変動は見られない。左下、右下のパネルではそれぞれ約 4.0 日周期、約 5.0 日周期の変動が低緯度から高緯度に渡って卓越していることがわかる。このように観測する時期によって卓越する波の周期や緯度分布は変化することが明らかにされた。

また、図 1.5b で示した紫外線での濃淡模様は風によって流されるためそれを追跡することによって風速を求めることができる。欧州宇宙機関(ESA)の金星探査機 Venus Express によって撮影された紫外画像を用いて雲追跡を行なうことで東西風速を導出した結果を図 1.7 に示す(Kouyama et al., 2013)。この図より東西風速も約 4.0-6.0 日周期で変動していることがわかる。観測されているこれらの周期 4.0-6.0 日の波は Kelvin 波であることが期待されており、線形化された primitive 方程式から図 1.8 のような水平構造を持つと想像されているが観測が乏しくこれを支持する根拠が欠けている。

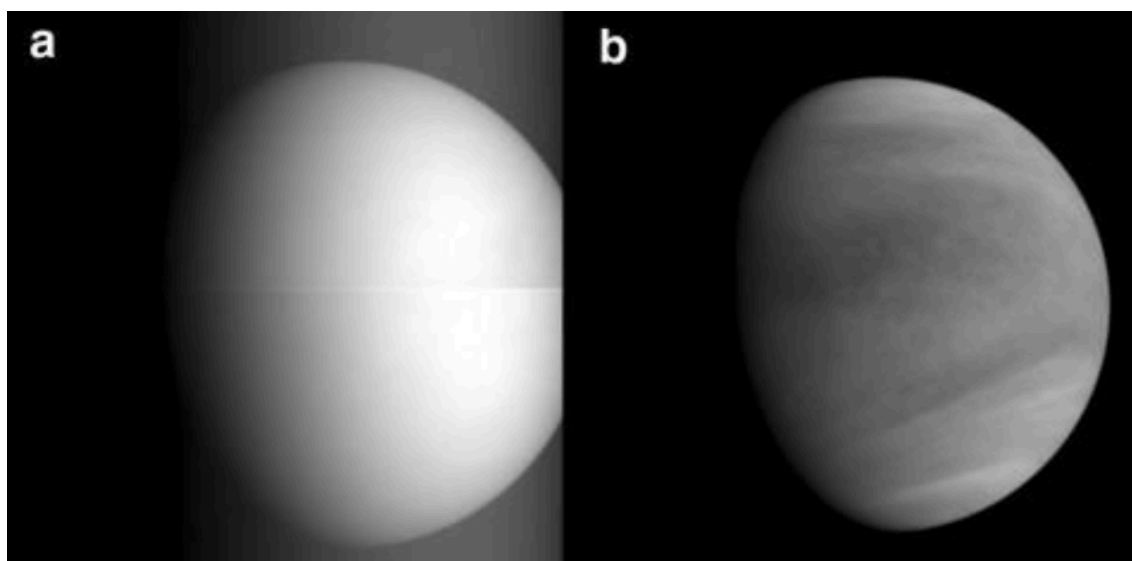


図 1.5: あかつき搭載の(a) IR1 (観測波長: 0.9 μm), (b)UVI (観測波長: 283 nm) によって撮影された金星 (Nakamura et al., 2016)

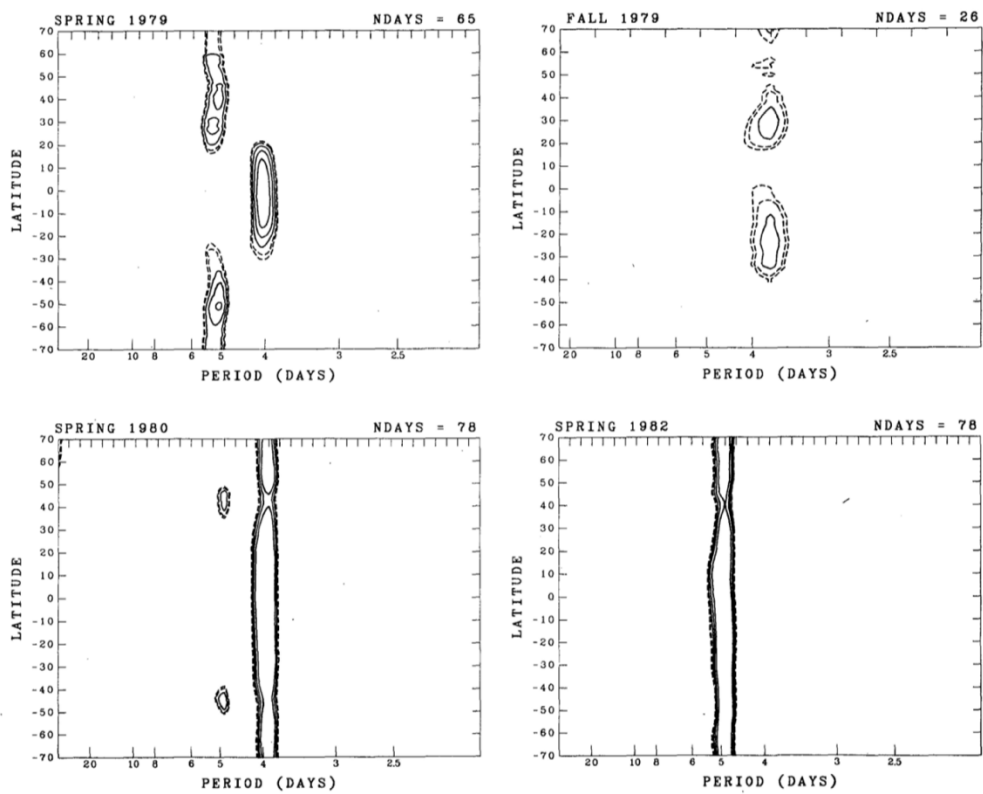


図 1.6 : Pioneer Venus オービターで撮像された紫外輝度の時系列をもとにした紫外輝度のパワースペクトル (DelGenio & Rossow., 1990)

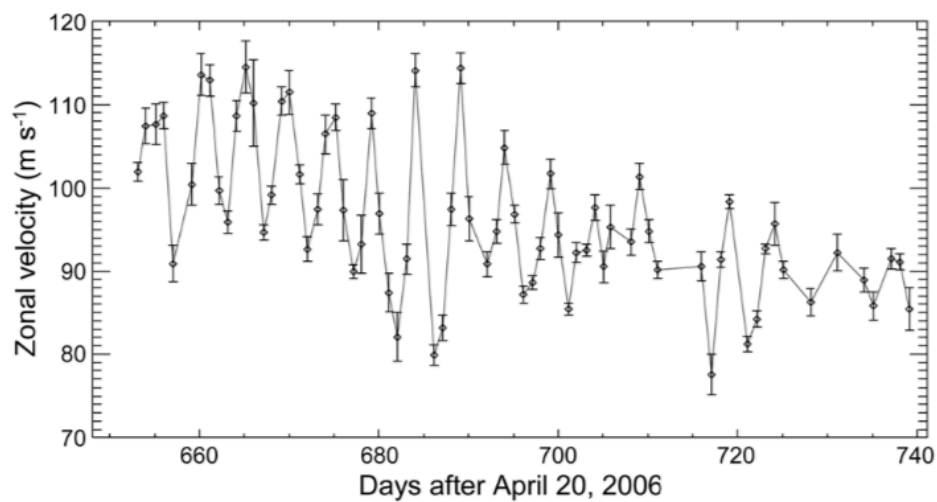


図 1.7 : Venus Express によって撮影された紫外画像を用いて雲追跡を行うこと
によって求めた南緯 18°における東西風速の変化 (Kouyama et al., 2013)

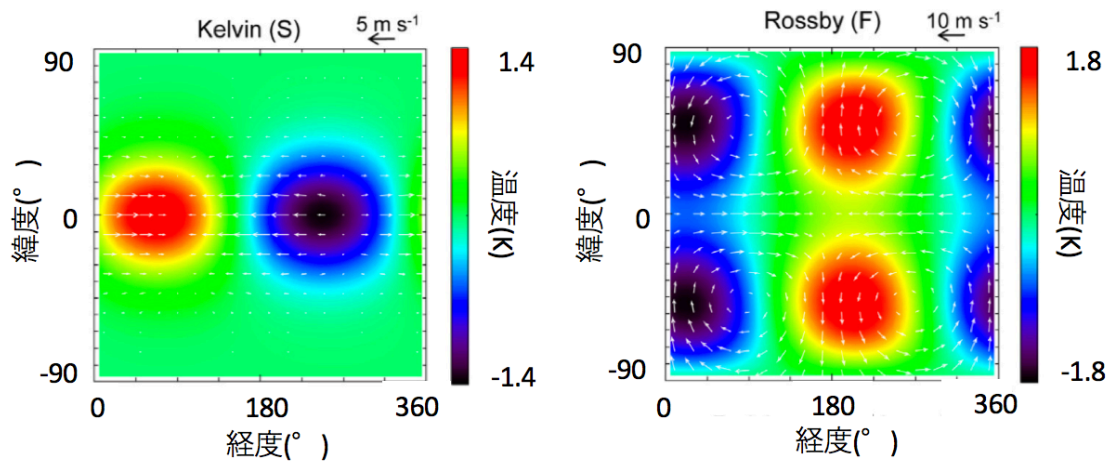


図 1.8: 高度 70km における Kelvin 波と Rossby 波の水平構造の線形解 (Kouyama et al., 2015)

高度 60-80 km に背景風を仮定し，線形化された primitive 方程式に境界条件として高度 60 km で周期 4-6 日周期の波を与えている。

1.2 研究目的

スーパーローテーションなどの金星の大気循環のメカニズムを解明するためには惑星規模の波動の理解が重要である。惑星規模の波動として，上でも述べたように紫外輝度，東西風速については約 4.0-6.0 日周期の変動が捉えられているが，観測が乏しく，波を同定するために重要な情報である振幅，位相の緯度依存性に関する情報がまだ得られておらず波の同定にいたっていない。また，風速とともに重要な力学情報である温度変動の周期性はこれまでに研究されていない。

本研究では，JAXA の金星探査機あかつきによって撮影された波長 $10\mu\text{m}$ の熱赤外画像を用いて金星雲頂部における温度の周期変動を検出し，複数の周期変動を分離し，それぞれの振幅と位相の緯度構造を調べることによって，波の時間空間構造を明らかにするとともに波の種類を同定することを目的とする。

2. 観測データ

本研究では JAXA の金星探査機あかつきに搭載されている中間赤外カメラ (longwave infrared camera, LIR)によって撮影された赤外画像を用いる。あかつきは軌道周期 10.8 日で図 2.1 のような金星の赤道周回軌道を周回している。また、あかつきは多波長での観測を行うために 5 台のカメラを搭載しており、LIR はそのひとつである。LIR の詳細は Taguchi et al.(2007) および Fukuhara et al. (2017) で解説されている。

LIR は波長 $8.0\text{-}12\ \mu\text{m}$ の赤外線を計測する。この波長域では金星に散乱される太陽光の影響は無視できるほど小さいため、金星自身が発する熱放射が支配的である。各ピクセルで計測される赤外線強度はこの波長での黒体放射と同じ赤外線強度をもたらすときの温度である「輝度温度」で表される。LIR の視野角は $16.4^\circ\times 12.4^\circ$ 、画素数は 328 ピクセル \times 248 ピクセルであり、探査機直下の金星表面でのピクセル解像度は今回用いたデータについては緯度・経度いずれについても約 $0.6\text{-}3.0^\circ$ の範囲である。異なる画像間にオフセットとして生じる系統誤差は約 3K、各画像内でランダムに生じる相対誤差は約 0.3K である。

図 2.2 に LIR の荷重関数を示す (Taguchi et al., 2007)。これは、大気から真上方向に射出される熱放射を大気圏外から観測するとして、LIR の観測波長において計測される赤外線フラックスに対する各高度からの熱放射の寄与をプロットしたものである。ここでは典型的な雲が存在する場合と雲が存在しない場合について経験的な大気モデルを用いて計算している。これを見ると雲が分布している場合には高度約 65km から出てくる熱放射をよく観測することがわかる。これは、図 2.3 に示した、NASA の金星探査機 Pioneer Venus プローブが金星大気中を降下しながら雲粒子観測機による観測で明らかにした鉛直雲粒子分布 (Knollenberg and Hunten, 1980)からもわかるように、高度 65km 付近の雲頂部からの熱放射が主に寄与するためである。

あかつきは通常 2 時間おきに全波長同時に画像を取得し、およそ 1 日に 1 度行われる地上との交信の際は撮影を休止する。そのほかの撮影休止期間もあるため数日～十数日観測が行われていない期間がある。本研究では観測された輝度温度の周期解析を行うためできるだけ連続的なデータであることが望ましい。また、できるだけ広い範囲の解析を行いたいため金星ディスク全体が視野に収まっている画像が望ましい。この解析上の要求に応えるデータセットとして

2017年5月18日から142日間(12±2時間おきに283個)のデータを解析に用いた。金星の自転軸の傾斜は約2.6°と小さく、公転軌道の離心率も小さいので、季節変化はほとんど存在しないと考えられるためどの時期のデータを用いても大きな違いはないことが期待される。

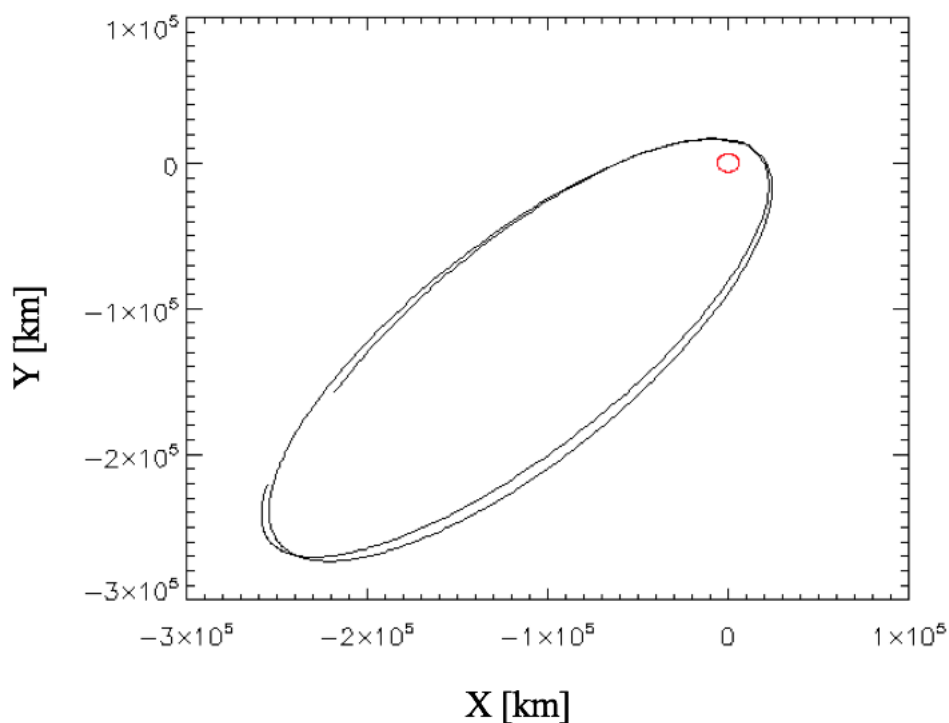


図 2.1: 金星を中心とした時のあかつきの2017年8月9日から21日間の軌道を黄道面に投影したもの。金星を赤丸で示す。

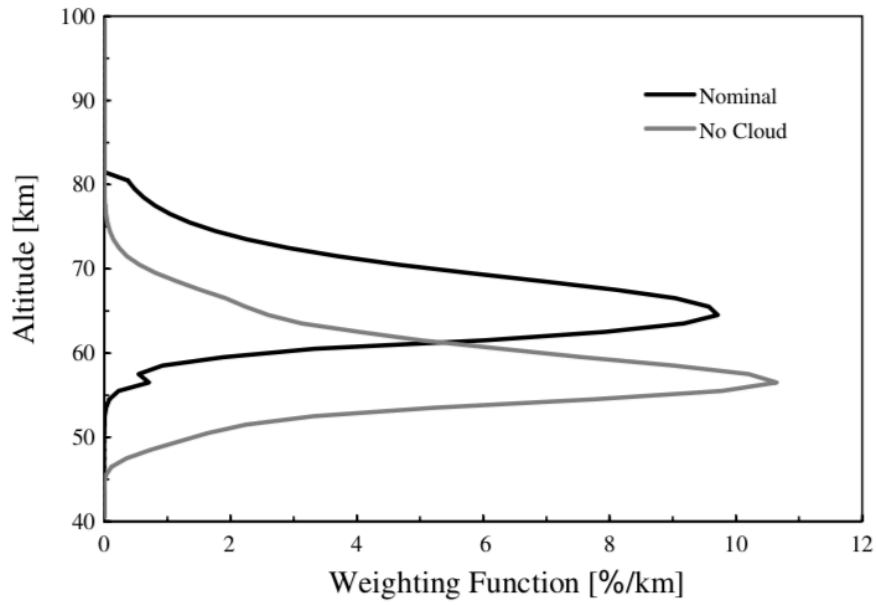


図 2.2 : LIR の荷重関数 (Taguchi et al., 2007)

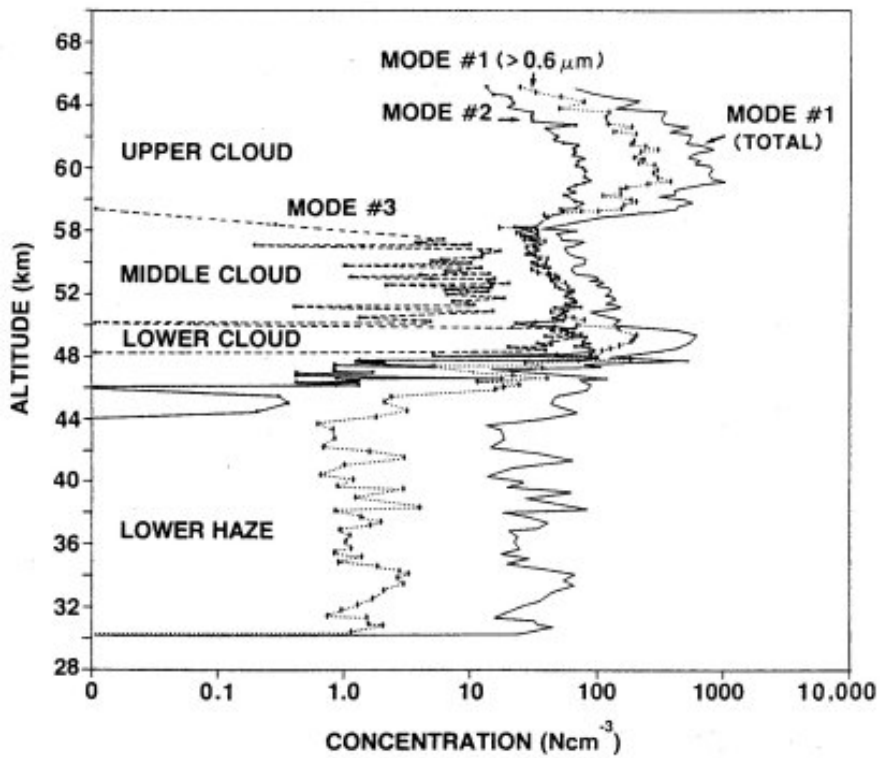


図 2.3 : Pioneer Venus プローブの雲粒子観測機によって捉えられた金星大気の鉛直雲粒子分布(Knollenberg and Hunten, 1980)

3. 輝度温度勾配の変動

3.1 輝度温度勾配に注目する理由

図1.8の理論的予測に見られるように、期待されている波の温度振幅は1 Kのオーダーである。そのような振幅の周期変動を観測データから検出するためには少なくとも0.50 K程度の観測精度が必要であると考えられる。第2章でも述べたようにLIRによる観測データには約3.0 Kの系統誤差と約0.30 Kの相対誤差が存在しており、系統誤差は期待される振幅より大きいため、連続した観測日間の温度変化からこのような周期変動を取り出すことは困難である。そこで、波の伝搬にともなって同一画像内で輝度温度の違いが生じることを利用する。同一画像内の同じ緯度で東西に離れた2箇所の輝度温度差を経度差で割ると、東西方向の温度勾配となる。この温度勾配には系統誤差ではなく相対誤差だけが影響するため、波を検出できる可能性がある。

例えば、2箇所のそれぞれで後述のようにおよそ4画素のデータを平均して輝度温度を計測する場合、その計測誤差は $(0.30 \text{ K}) / \sqrt{4.0} \sim 0.15 \text{ K}$ 程度となり、2箇所の経度差を以下の解析での最小値である 20° とすると、温度勾配の誤差は $0.15 \text{ K} / 20^\circ \sim 0.0075 \text{ K deg}^{-1}$ 程度である。一方、温度振幅 A と温度勾配の振幅 B の間には、水平波長を λ として

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \times A \quad (3.1)$$

という関係がある。ここでは理論的予測やこれまでの紫外線での観測結果をもとに、東西波数1.0、つまり東西方向に惑星を1周して1波長という波を考えることにし、温度振幅を1.0 Kとすると上の式から温度勾配の振幅は 0.017 K deg^{-1} となる。これは見積もった誤差より大きいため温度勾配の周期変動を観測データから検出するために十分な精度があると言える。

3.2 出射角依存性

輝度温度の経度方向の勾配を導出する際には観測高度をそろえる必要がある。このことは周縁減光を考えると理解できる。周縁減光とは金星などの大気を持つ天体の熱放射をマッピングする際に中心から縁に向かって暗く見える現象である。この現象は大気温度が高度とともに低下している場合に起こる。図3.1に金星での周縁減光の模式図を示す。点線は衛星直下点で観測される熱放射が出てくる高度を示している。この高度から出てくる熱放射は出射角(観測地点から見て天頂方向と観測者の方向のなす角：図3.1参照)が大きくなるほど、つまり中心から縁に向かうほど金星大気を通過する距離が増加する。熱放射が金星大気を通過する距離が伸びるとその分大気によって吸収、散乱される量が大きくなり衛星に到達する前に消えてしまう。その結果出射角が大きくなるに連れより高い高度から出てくる熱放射を観測することになる。金星大気では図3.2に示したように高度と共に温度が低下するので周縁減光が起こる。

以上の効果により単に任意の2点を選び輝度温度勾配を求めてもそれには大気温度の水平構造、鉛直構造両方の影響が含まれるため解釈が難しい。そのため本研究では衛星から見て東側と西側で解析する点の出射角を揃えることにより水平構造のみを取り出す。

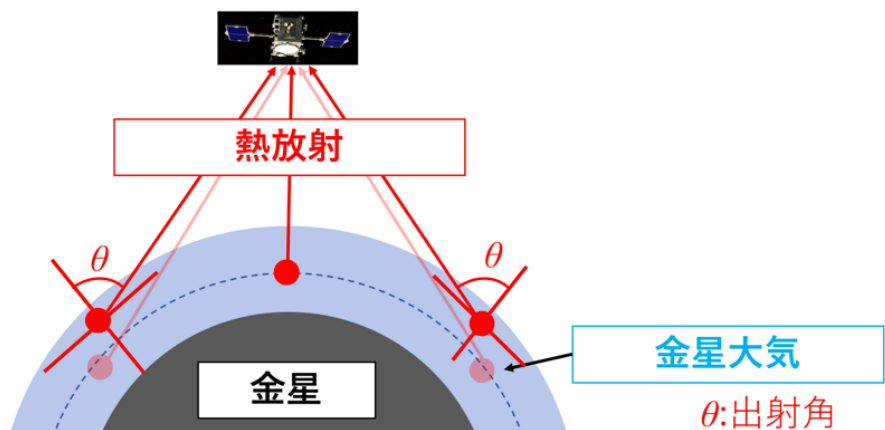


図3.1：周縁減光の模式図

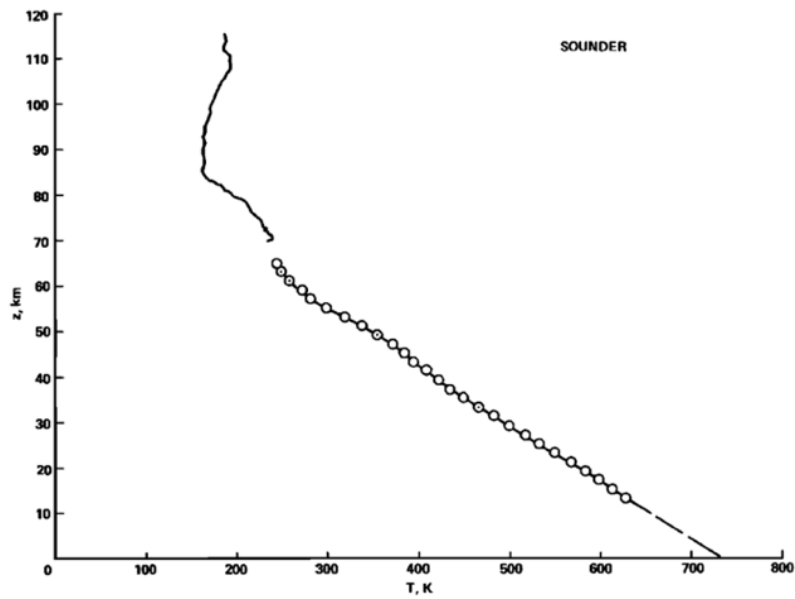


図3.2 : Pioneer Venusによって観測された金星大気の鉛直温度構造 (Seiff et al., 1980)

3.3 輝度温度勾配の導出手順

前述のように，金星画像から特定の緯度に沿ってデータを読み出して解析を行う．画像にそのような等緯度線を重ねた例を図3.3に示す．

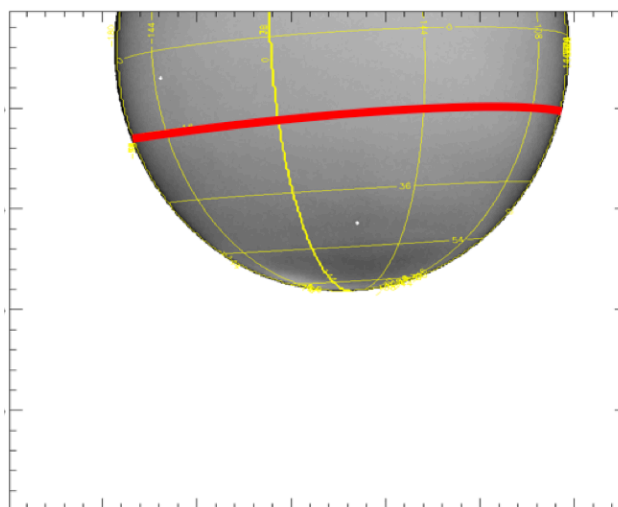
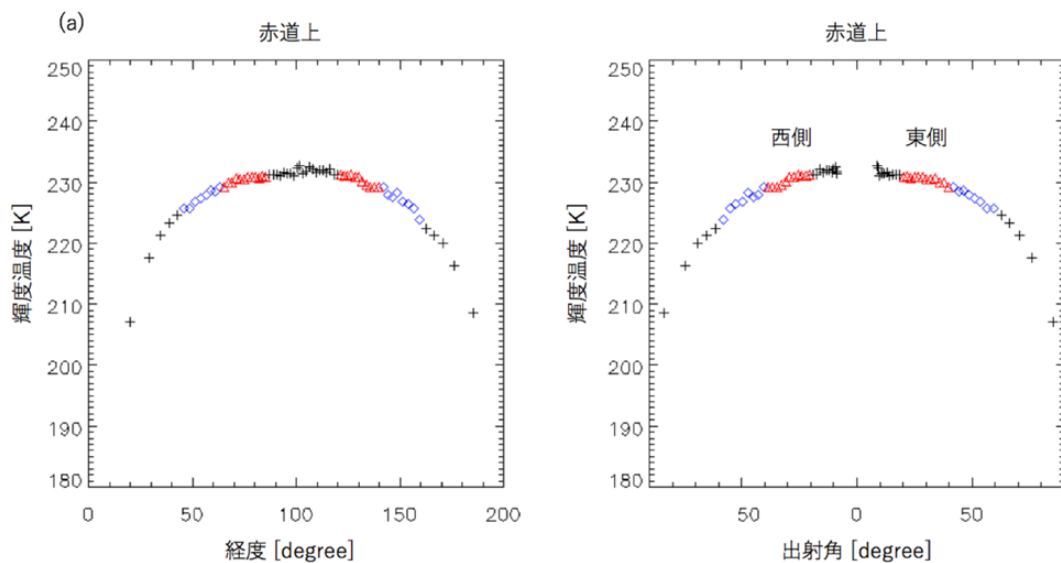
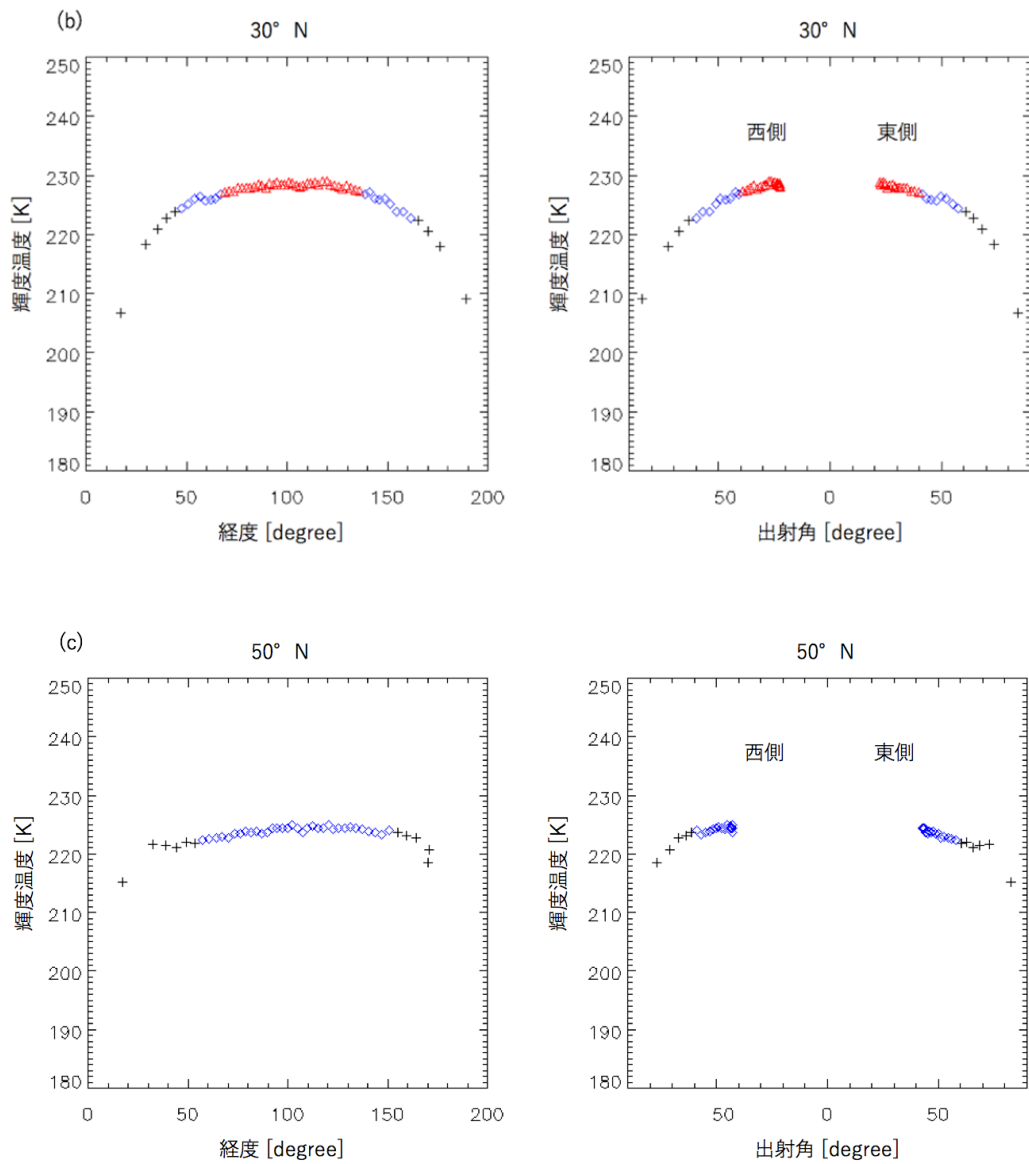


図3.3 : LIRによる観測画像に15°Sの緯度線(赤線)を重ねたもの．
2016年3月14日06:08のデータ

3つの緯度における輝度温度と経度、輝度温度と出射角の関係の例を図3.4に示す。出射角20-40°の範囲のデータ点を赤三角で表し、出射角40-60°の範囲のデータ点を青いひし形で表し、それ以外のデータ点を黒い十字で表している。輝度温度-出射角の図では、金星ディスク上の西側のデータ点を左半分に、東側のデータ点を右半分にプロットしてある。出射角が大きくなるにつれ輝度温度が低下しており3.2節で述べた周縁減光の影響を見て取ることができる。また、あかつきは赤道周回軌道を周回しているために低緯度では出射角がゼロに近い領域まで観測できるが、高緯度になるにしたがって出射角が大きい領域しか観測できないことになる。東西方向の差分により勾配を求めるためには経度を隔てた2領域間が近接していることが望ましく、そのためにはなるべく出射角の小さい領域を解析に用いたいが、一方で、高緯度までをカバーするためには出射角の大きい領域を使わざるを得ない。ただし、出射角が60°以上になるとデータ点が疎らになるため計測誤差の影響を抑える観点からは望ましくない。これらを勘案して、ここでは出射角20-40°と40-60°の2通りで解析する。出射角20-40°では緯度20°S-20°N、出射角40-60°では緯度50°S-50°Nの範囲が対象となる。

図3.4 : (a)赤道, (b)30°N, (c)50°Nにおける (左)輝度温度と経度の関係, および (右)輝度温度と出射角の関係. 2017年5月25日17:18のデータ.
出射角20-40° の範囲のデータ点を赤三角で表しており, 出射角40-60° の範囲のデータ点を青いひし形で表している.





次に、経度を隔てた2領域間の差分により温度勾配を求めることに起因する温度勾配の誤差を考える。解析に用いたデータでは出射角20-40°の範囲において経度差は最大で60°程度、出射角40-60°の範囲において経度差は最大で100°程度である。経度が60°離れている2点と100°離れている2点から導出した温度勾配を考える。本研究では東西波数1.0の波を考えているので、それともなう温度変動 W_{true} は振幅を A [K]、経度を λ [deg] とすると式(3.2)で表される。

$$W_{true} = A \sin(\pi\lambda/180) \quad (3.2)$$

また、真の温度勾配 G_{true} は式(3.3)で表され、経度差がある2点より導出した温度勾配 G_{obs} は経度差 $d\lambda$ を用いて式(3.4)で表される。

$$G_{true} = \frac{\pi}{180} A \cos(\pi\lambda/180) \quad (3.3)$$

$$G_{obs} = \frac{A\{\sin(\pi(\lambda+0.5d\lambda)/180) - \sin(\pi(\lambda-0.5d\lambda)/180)\}}{d\lambda} \quad (3.4)$$

$A = 1.5$ [K]と仮定した場合の G_{true} と $d\lambda = 60^\circ$, 100° とした場合の G_{obs} を図3.5に示す。この結果を見ると振幅の誤差は14%程度に収まっており、今回の解析では十分な精度であると考えられる。

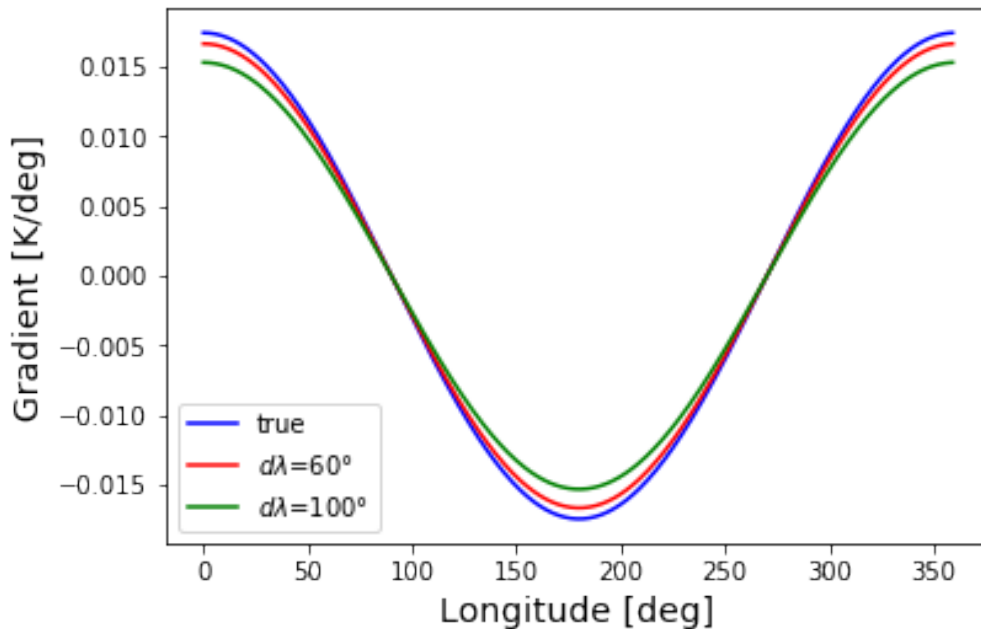


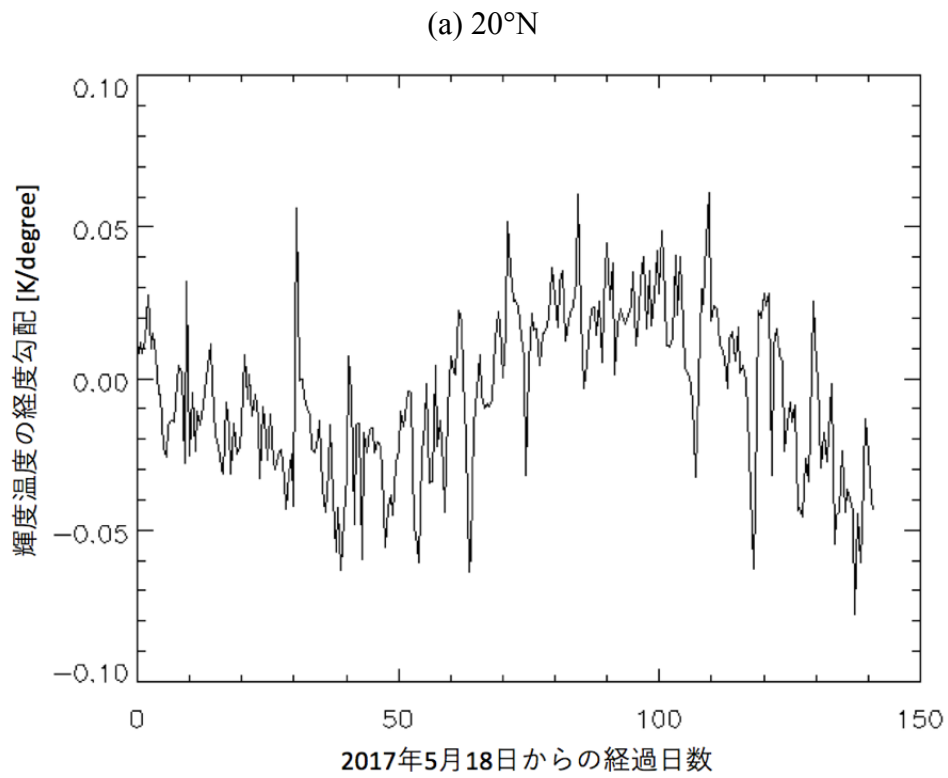
図3.5：真の温度勾配と経度差がある2点より導出した温度勾配

以下に出射角40-60°を解析する場合の具体的な輝度温度勾配の導出手順を示す.

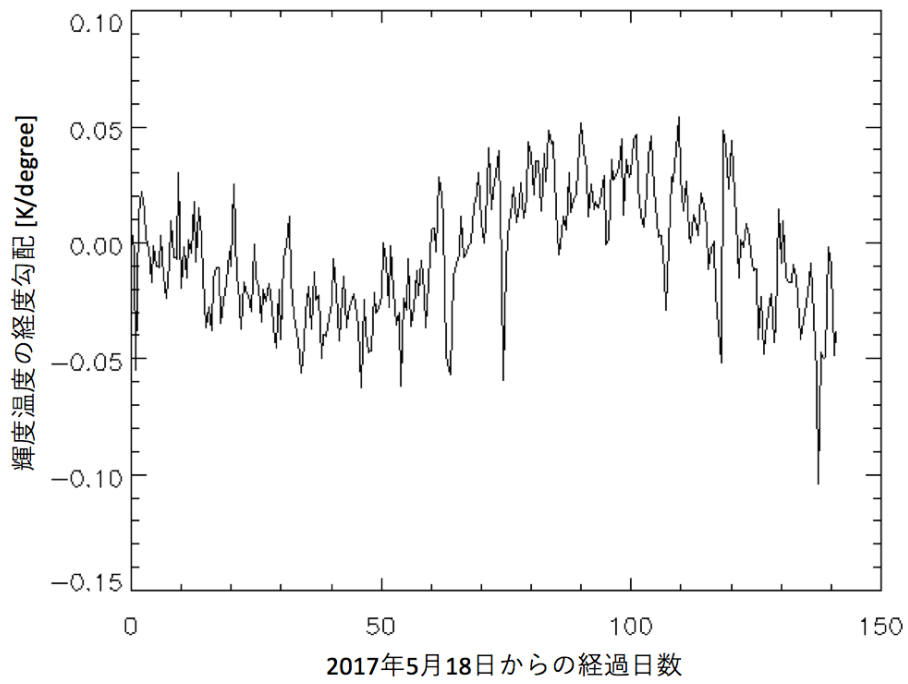
- ① 画像データの金星ディスク上の任意の緯度において経度方向に輝度温度と出射角を読み出す. (図3.3)
- ② 衛星から見て東側西側それぞれにおいて出射角40-60°の範囲の平均輝度温度と平均経度を計算する.
- ③ ②で求めた平均輝度温度と平均経度の東西差分を求め, 平均輝度温度差を平均経度差で割ることで輝度温度勾配を求める.

2017年5月18日6時頃から12±2時間ごとに142日間にわたる, 283個のデータを用いて, 以上のようにして求めた輝度温度勾配を時系列に並べたものを図3.6, 3.7に示す.

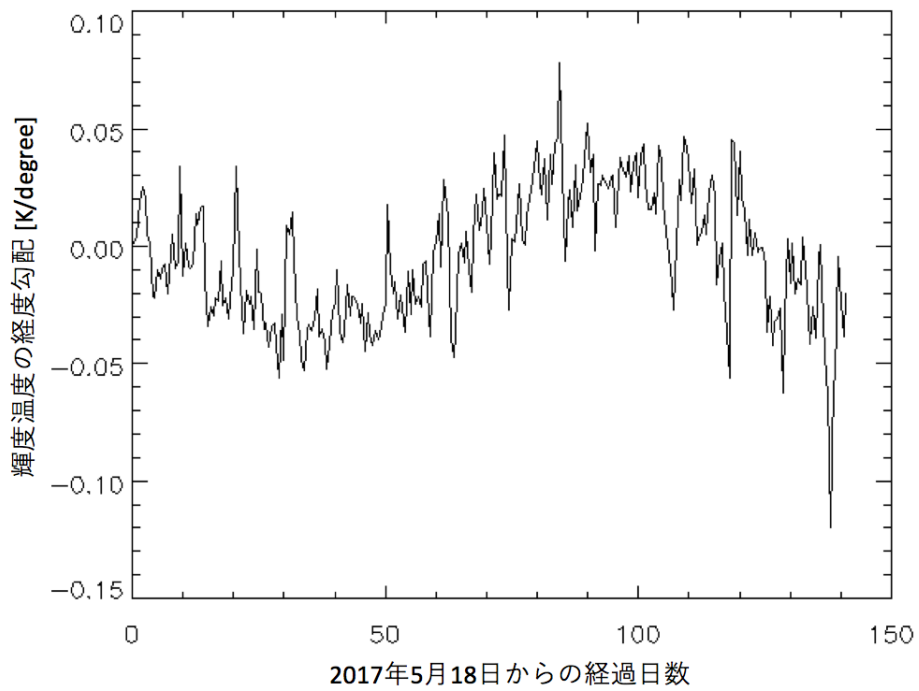
図3.6： 出射角 20° - 40° のデータを用いて求めた(a) 20° N, (b) 10° N, (c) 赤道上, (d) 10° S, (e) 20° Sにおける輝度温度勾配の時系列
データ欠損は(a) 3点, (b) 3点, (c) 3点, (d) 4点であり, 線形補間で内挿している.



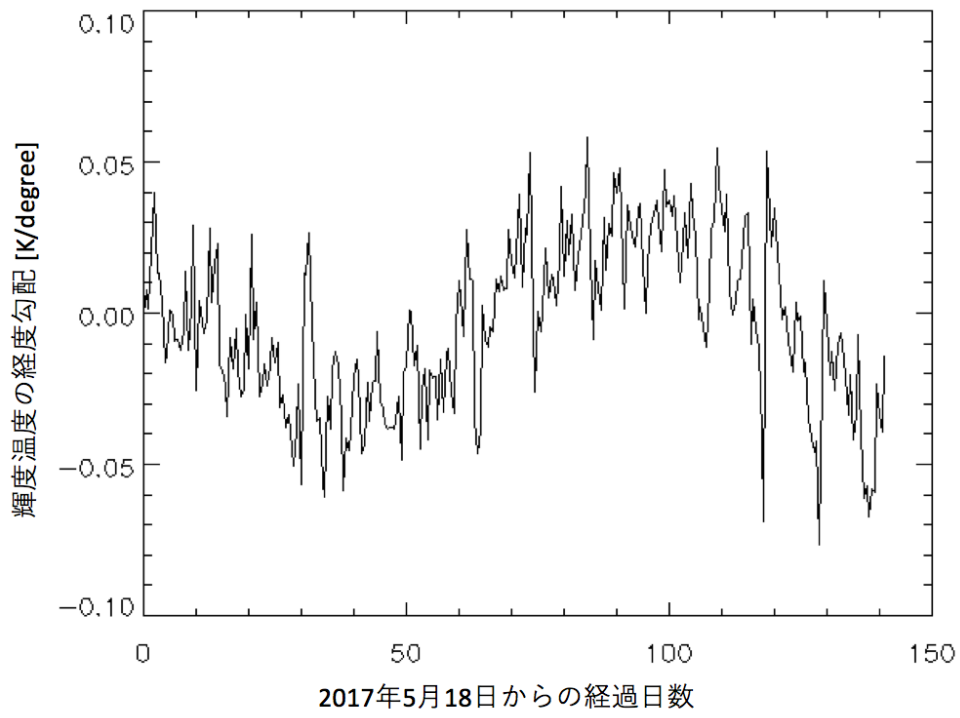
(b) 10°N



(c) 赤道上



(d) 10°S



(e) 20°S

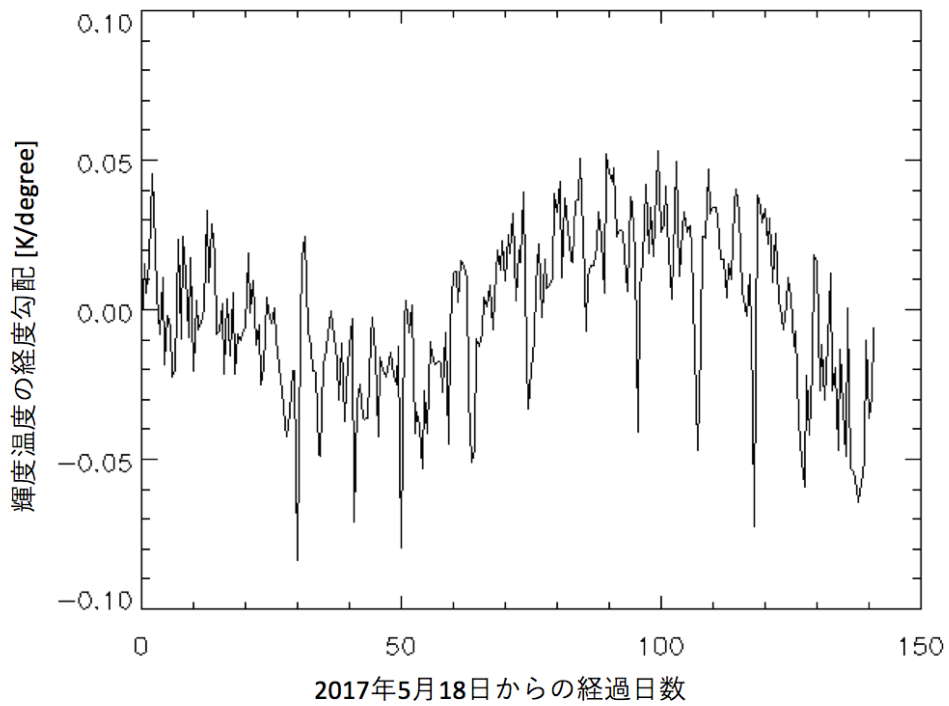
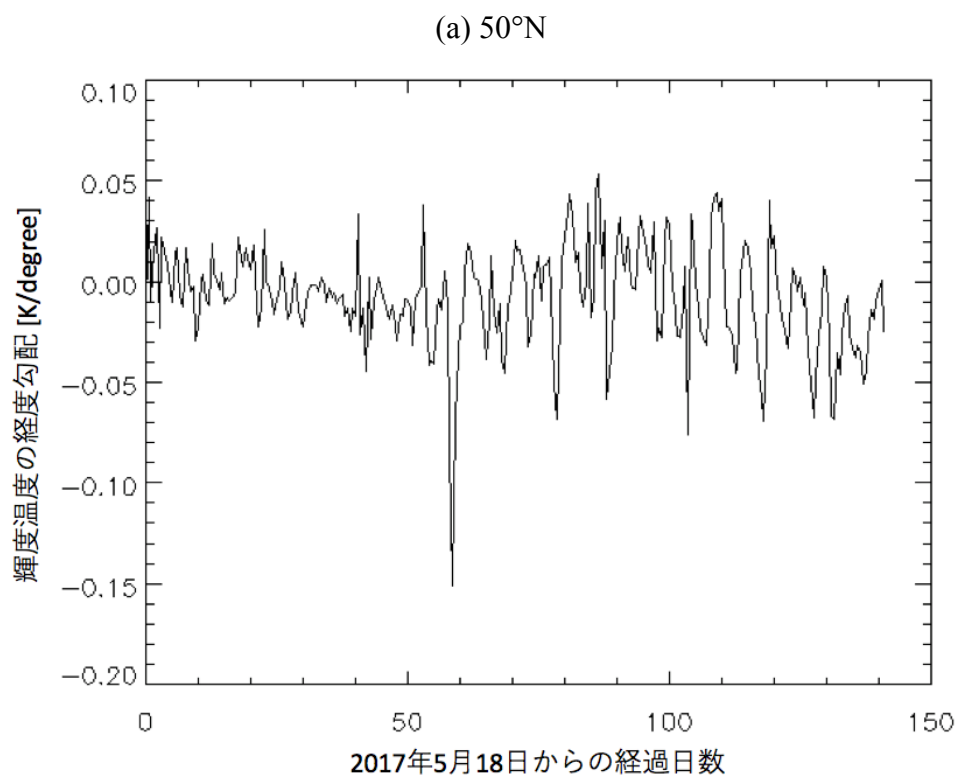
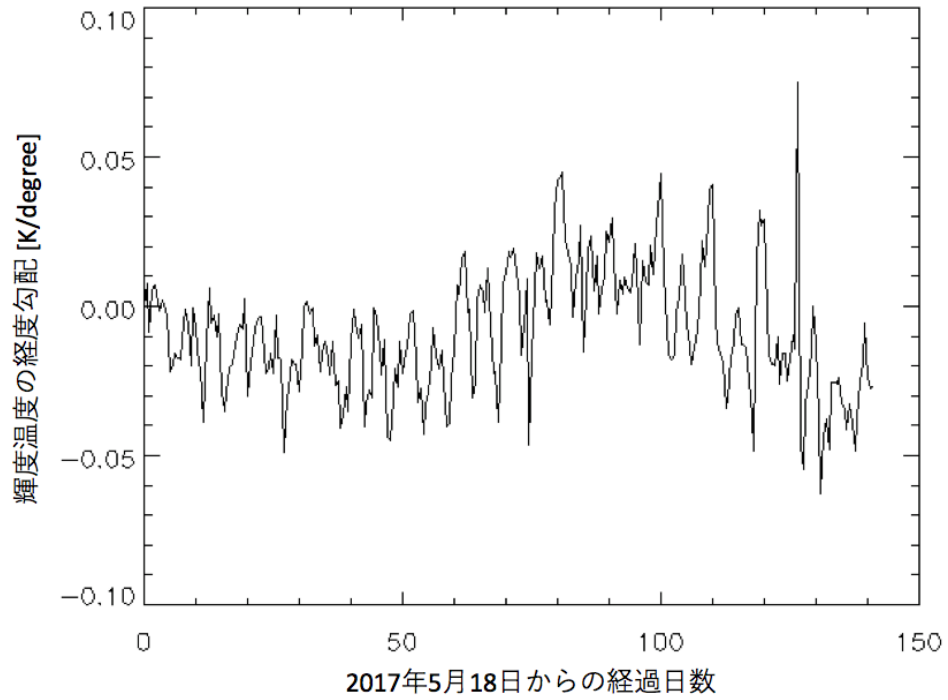


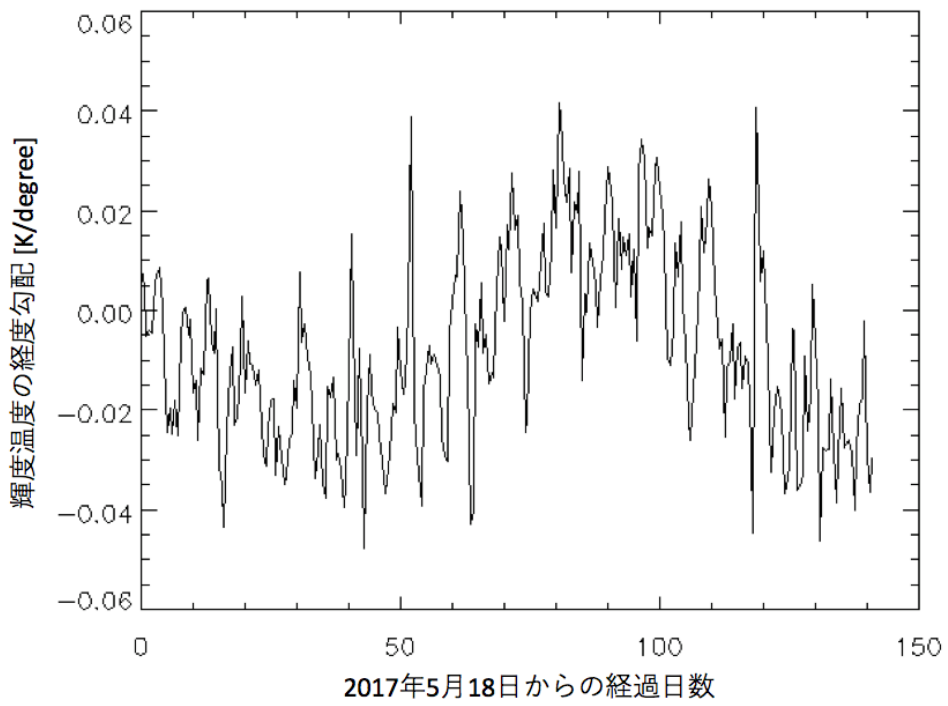
図3.7: 出射角 40° - 60° のデータを用いて求めた(a) 50°N , (b) 40°N , (c) 30°N , (d) 20°N , (e) 10°N , (f) 赤道上, (g) 10°S , (h) 20°S , (i) 30°S , (j) 40°S , (k) 50°S における輝度温度勾配の時系列
データ欠損は(a) 3点, (b) 3点, (c) 3点, (d) 3点, (e) 3点, (f) 3点, (g) 3点
(h) 5点, (i) 4点, (j) 10点, (k) 37点であり, 線形補間で内挿している.



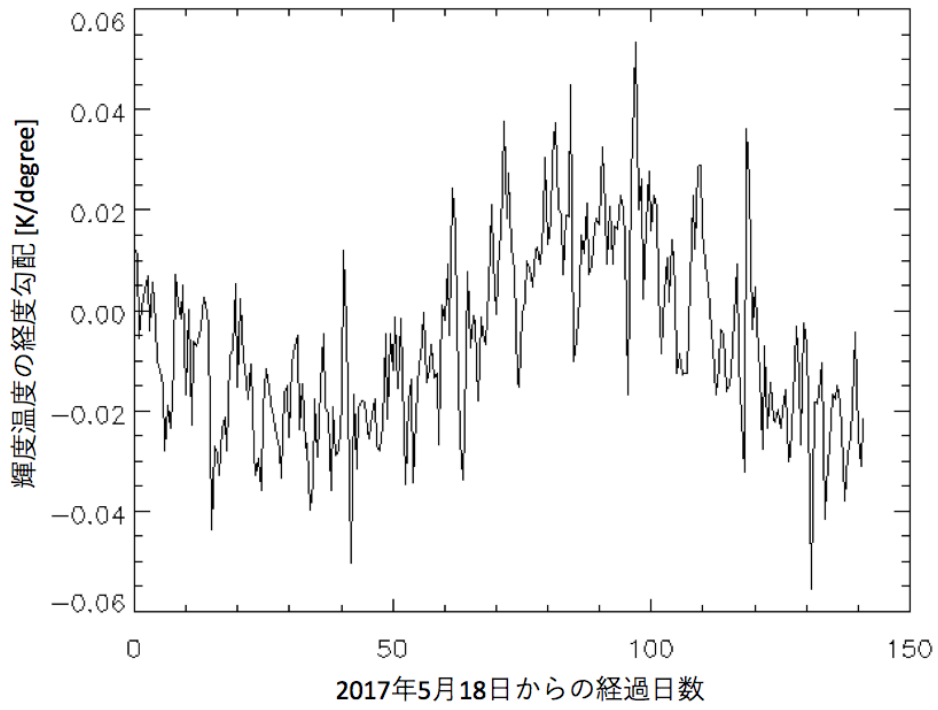
(b) 40°N



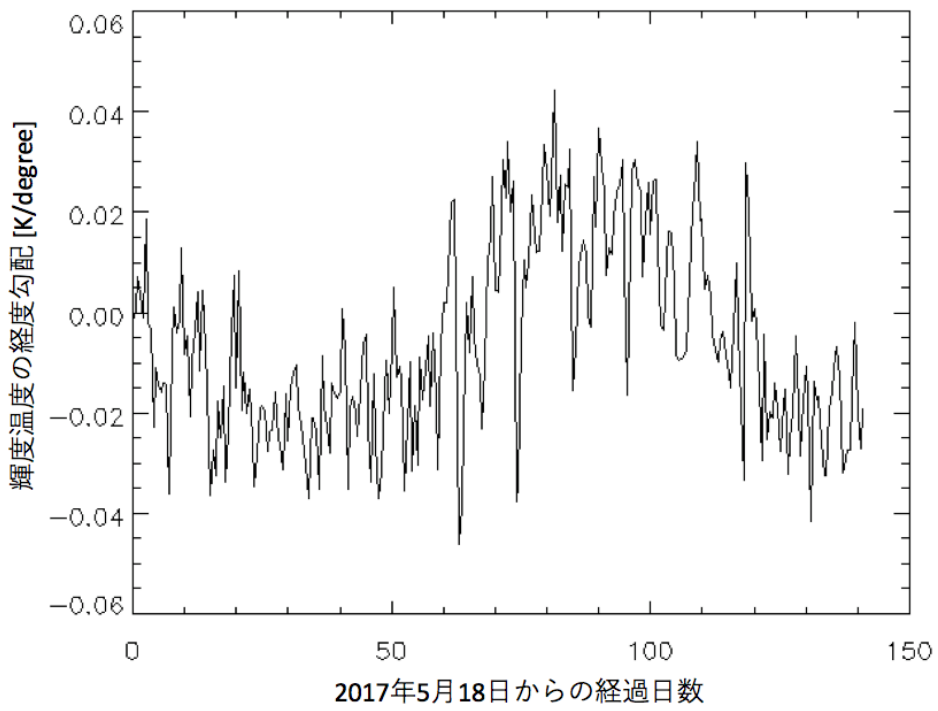
(c) 30°N



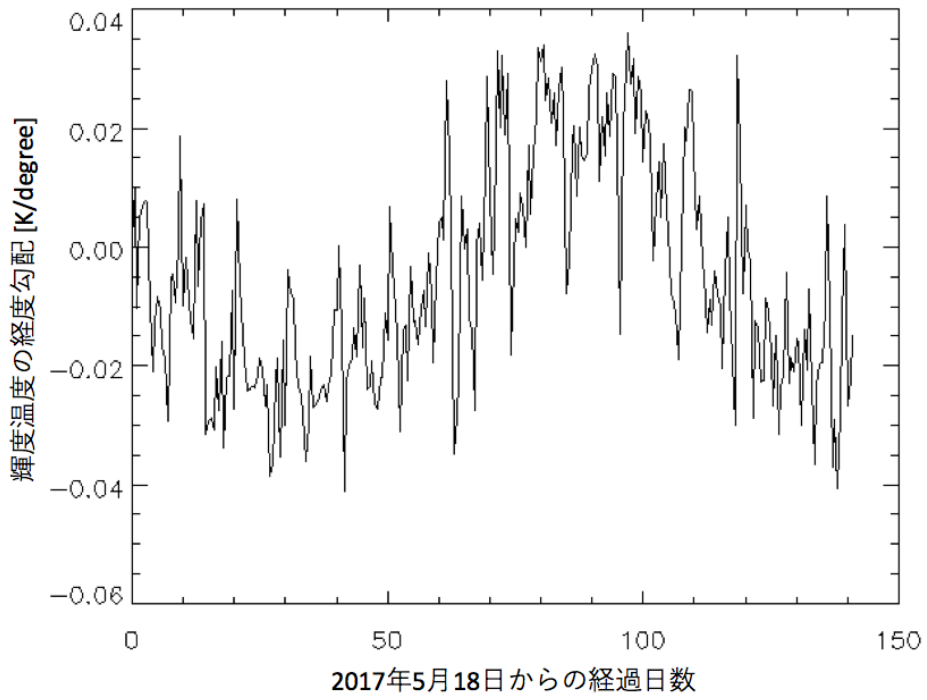
(d) 20°N



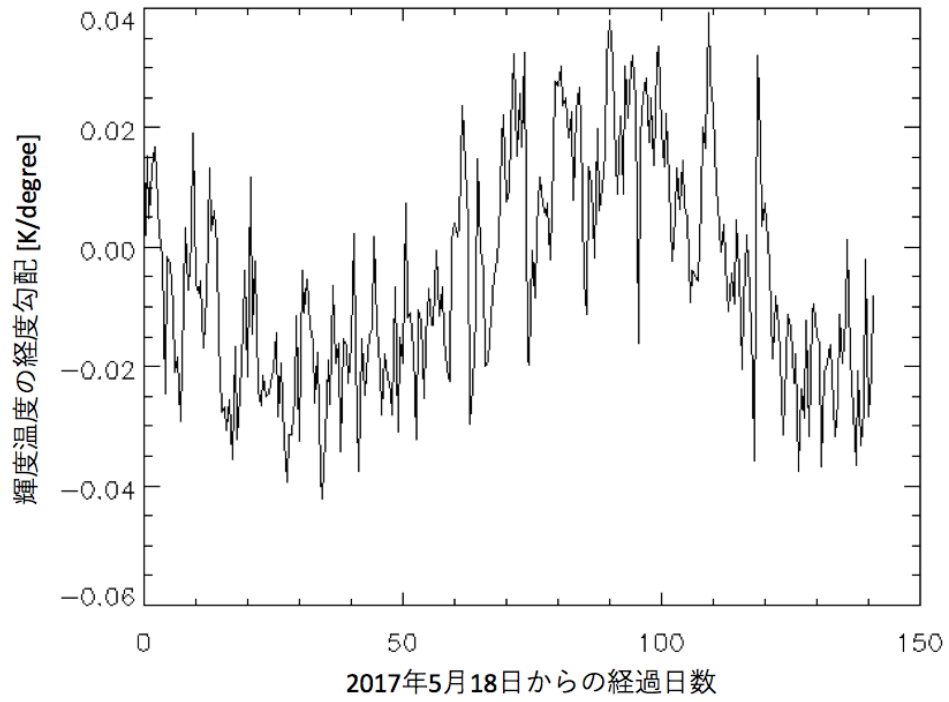
(e) 10°N



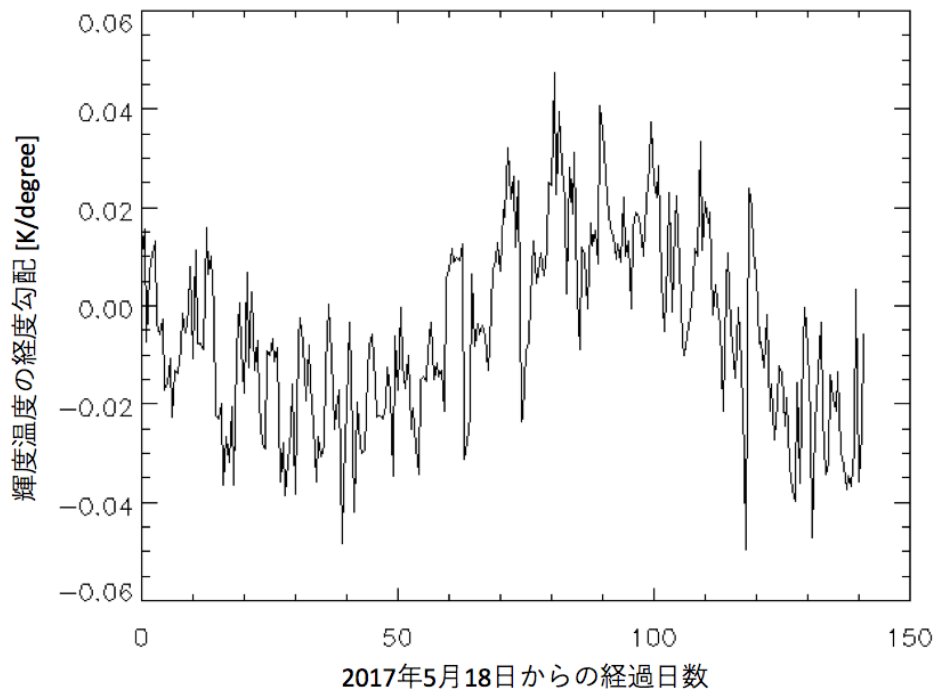
(f) 赤道上



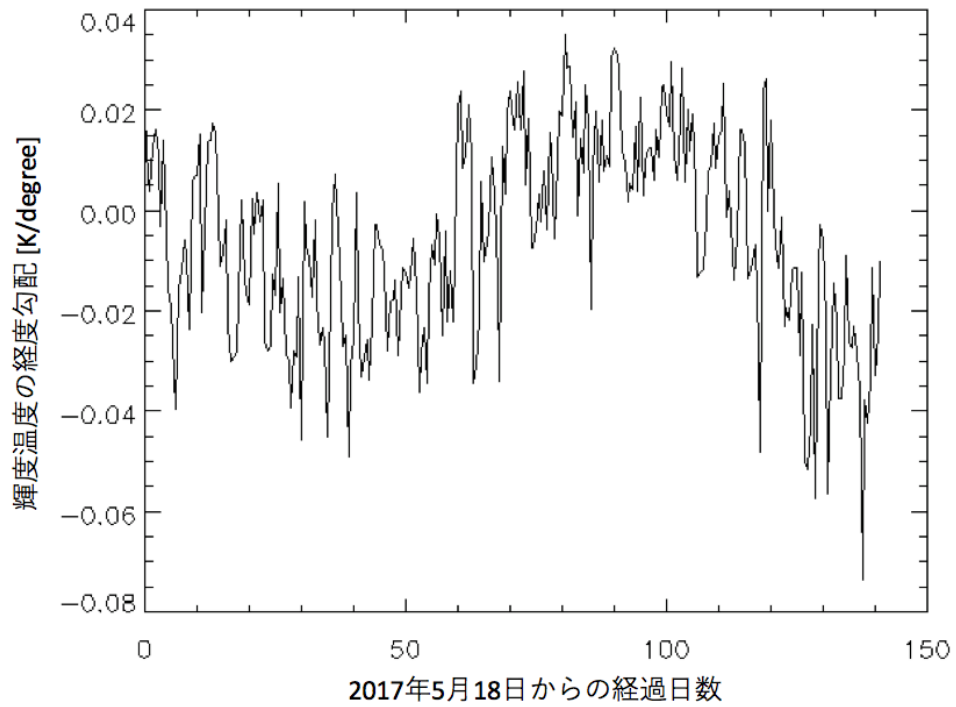
(g) 10°S



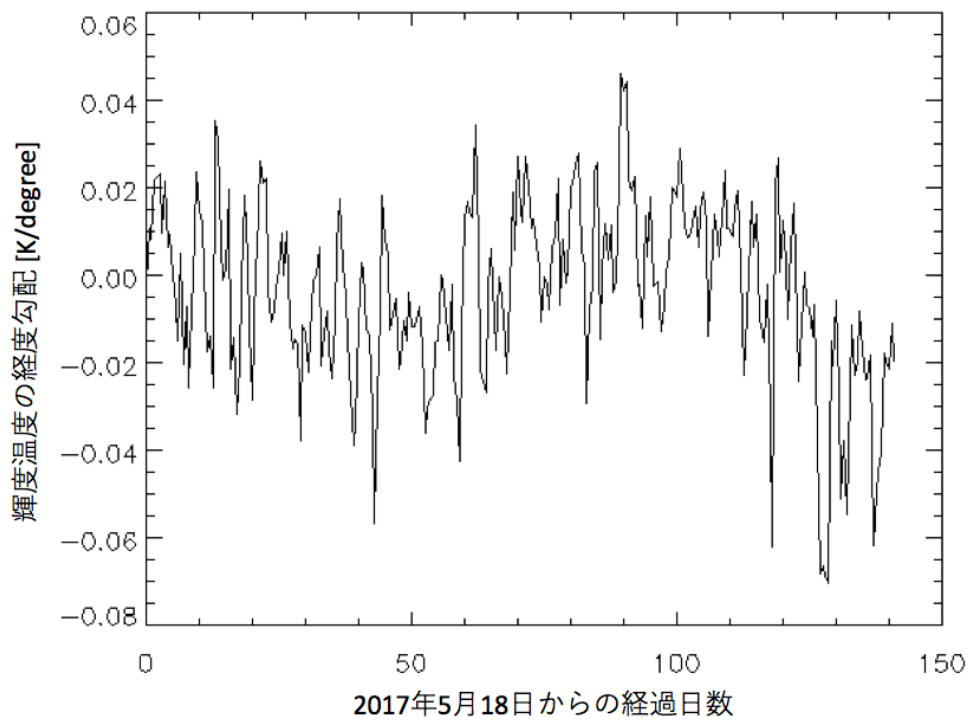
(h) 20°S



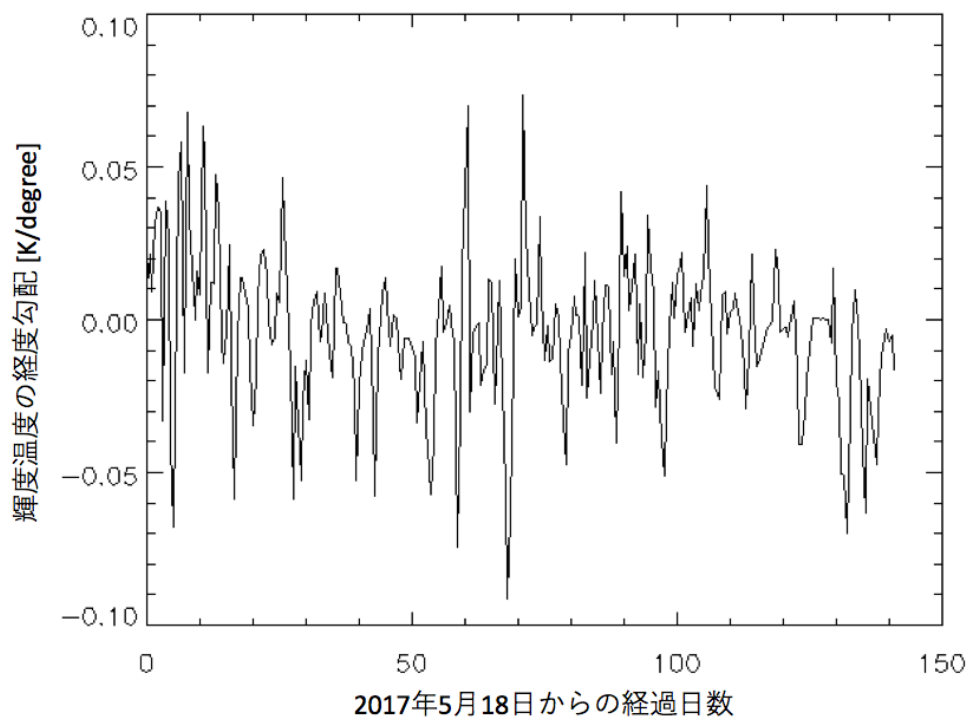
(i) 30°S



(j) 40°S



(k) 50°S



4. Fourier解析

3章で複数の緯度において輝度温度勾配の導出を行った。本章では3章で導出した輝度温度勾配の時系列データを周期解析することによってどのような周期、振幅、位相を持った成分が含まれているかを明らかにする。ここでは高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform, FFT)を用いて周期解析を行う。

4.1 解析手順

Fourier 変換とは式(4.1)で定義されるものであり、解析対象のデータを正弦波の足し合わせで表現する手法である。

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (4.1)$$

この Fourier 変換を行うことでデータに含まれる各周波数成分について振幅と位相を求めることができる。

Fourier 変換は連続関数について定義されているが本研究で解析対象としている輝度温度勾配の時系列は離散的なものであるため式(4.2)で定義される、Fourier 変換を離散化した離散 Fourier 変換を用いる。以下の式では時刻を t 、周波数を f 、標本点の個数を N とする。

$$F(f) = \sum_{t=0}^{N-1} f(t)e^{-i\frac{2\pi ft}{N}} \quad (4.2)$$

この離散 Fourier 変換を計算機上で高速に計算するアルゴリズムが FFT である。

有限区間の FFT 解析はその区間のパターンが前後に無限に繰り返すようなデータの Fourier 変換と同等である。観測期間の最初と最後のデータが連続的につながるような特殊な場合を除き、区間の境界でデータの不連続が生じる。そのような不連続点は物理的に意味のない高周波成分を含むため、この影響を軽減する必要がある。そこで一般的に FFT 解析を行う前に解析対象のデータに窓関数をつけることで強制的にデータの両端をゼロに漸近させ、連続的なデータに変換する。本研究では最もよく使われる窓関数の一つであり式(4.3)、図 4.1 の形で表される hanning 窓を用いた。

$$w(t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\pi \frac{t}{T} \quad (0 \leq \frac{t}{T} \leq 1) \quad (4.3)$$

ここで t は時間であり， T はデータ区間の長さである．

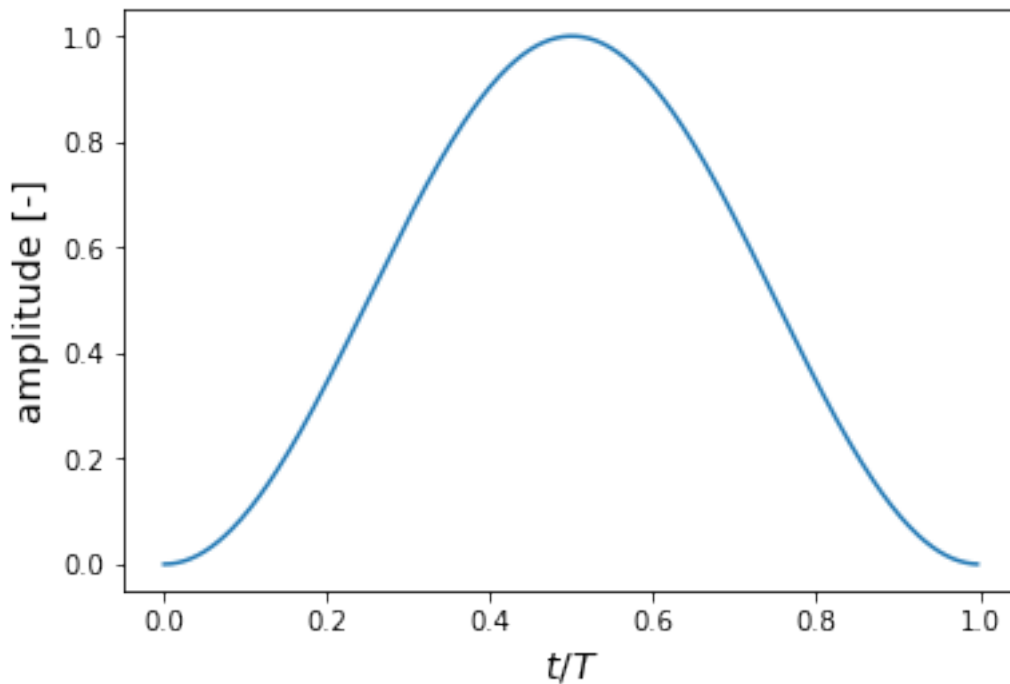
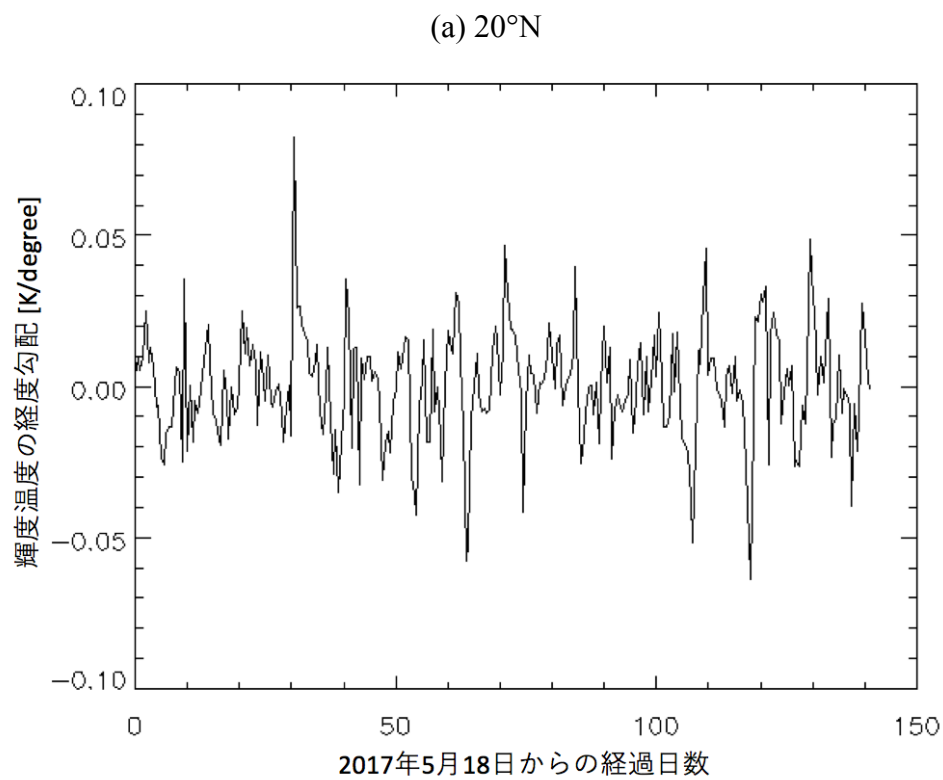


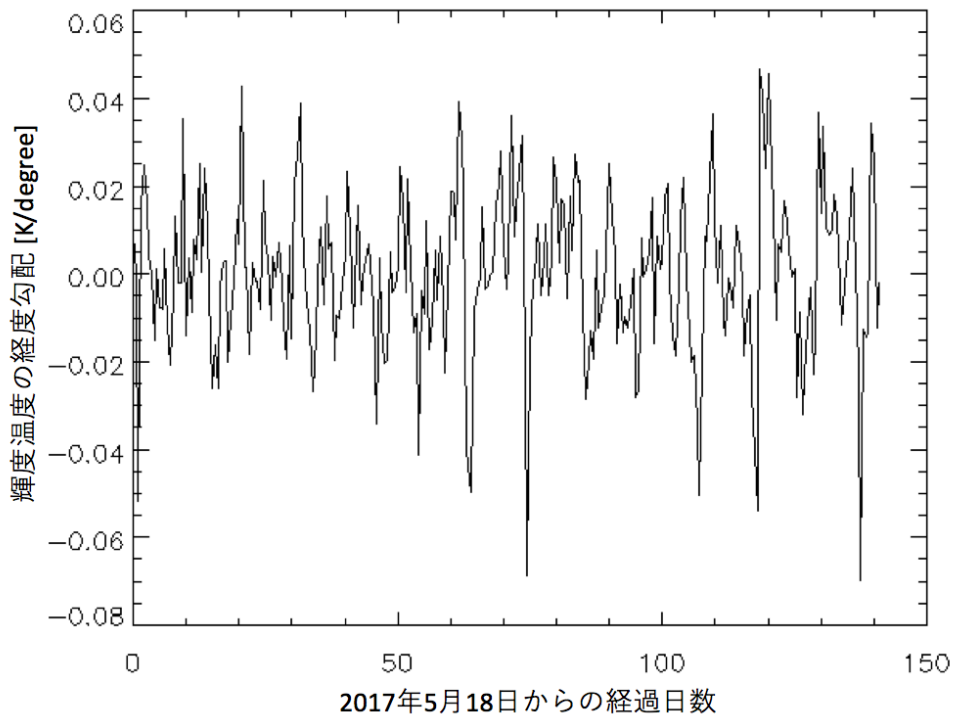
図 4.1 : hanning 窓

解析対象のデータに解析区間の長さと同程度かそれ以上の時間スケールの変動が含まれている場合，有限区間の FFT の結果においては，その周期変動が全ての周波数成分に偽の振幅として混入することになる．そのため解析対象のデータに多項式を最小二乗法でフィッティングして，それを差し引くことであらかじめ長周期の変動による影響を抑える．元の輝度温度勾配の時系列データからフィッティングした 3 次多項式を差し引いたものを，出射角 20-40°から求めた結果については図 4.2 に，出射角 40-60°から求めた結果については図 4.3 に示す．3 次多項式の代わりに 4 次多項式，5 次多項式を用いた解析も行ったが，今回対象とする数日周期の変動の解析結果はほとんど変化しなかった．

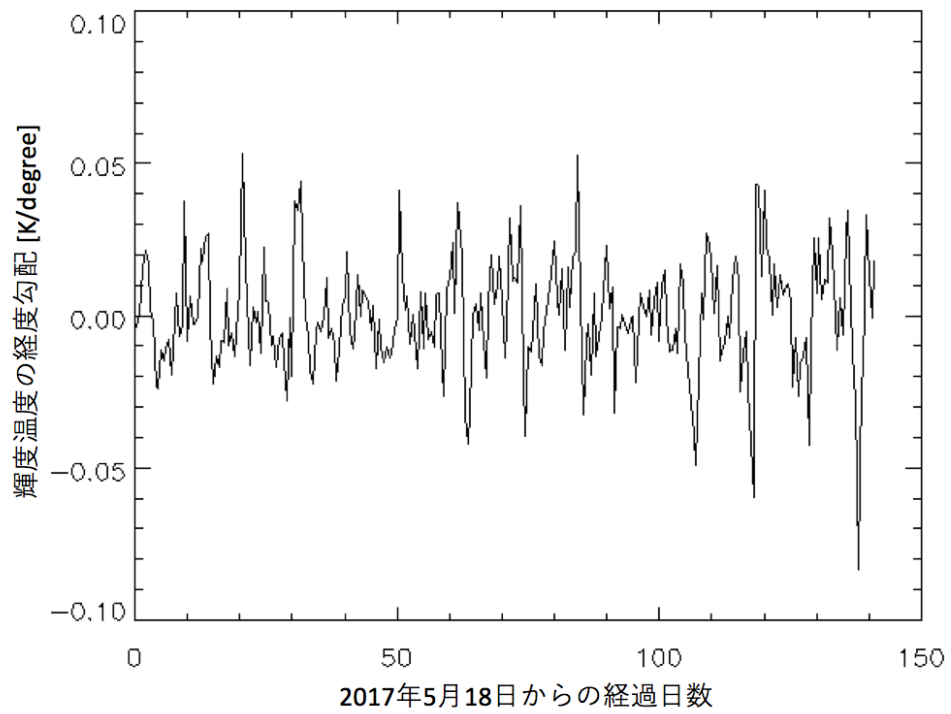
図 4.2 : 出射角 20-40°のデータを用いて導出した(a) 20°N, (b) 10°N, (c) 赤道上, (d) 10°S, (e) 20°S における輝度温度勾配の時系列から長周期成分を除いたもの.



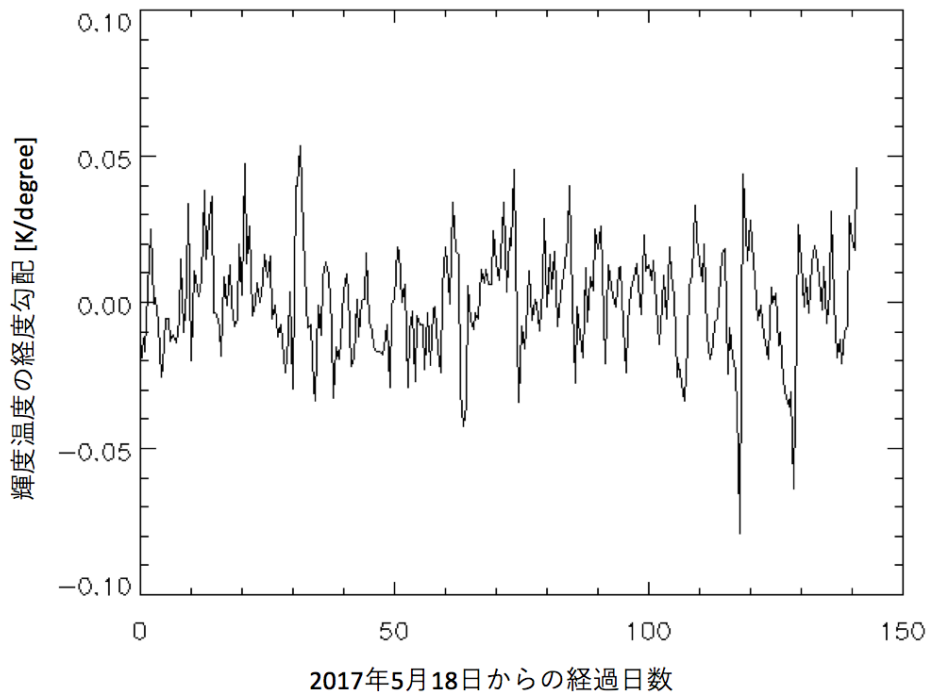
(b) 10°N



(c) 赤道上



(d) 10°S



(e) 20°S

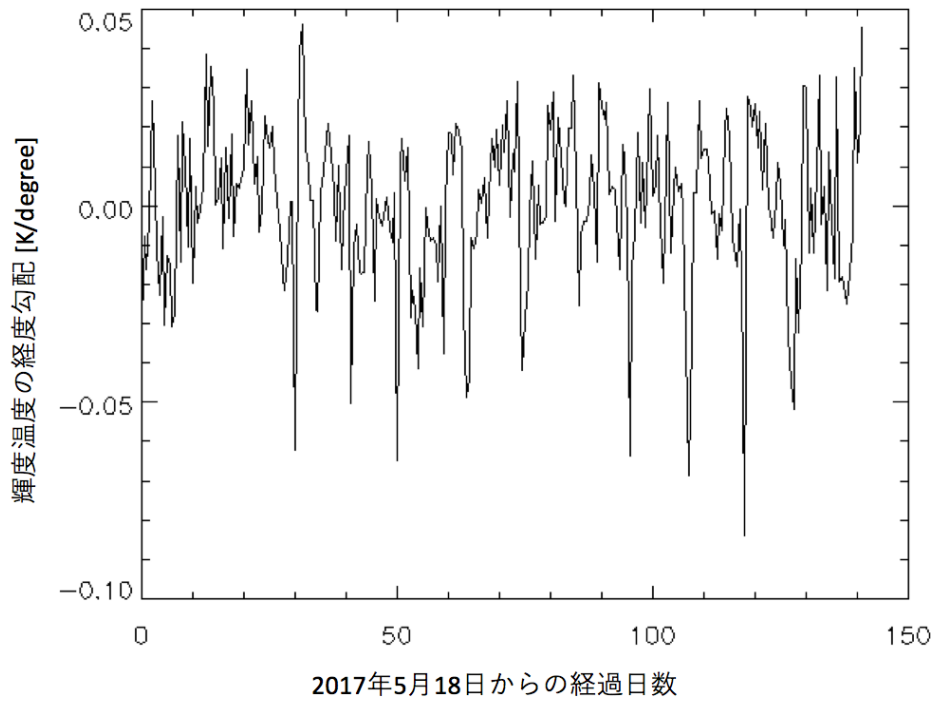
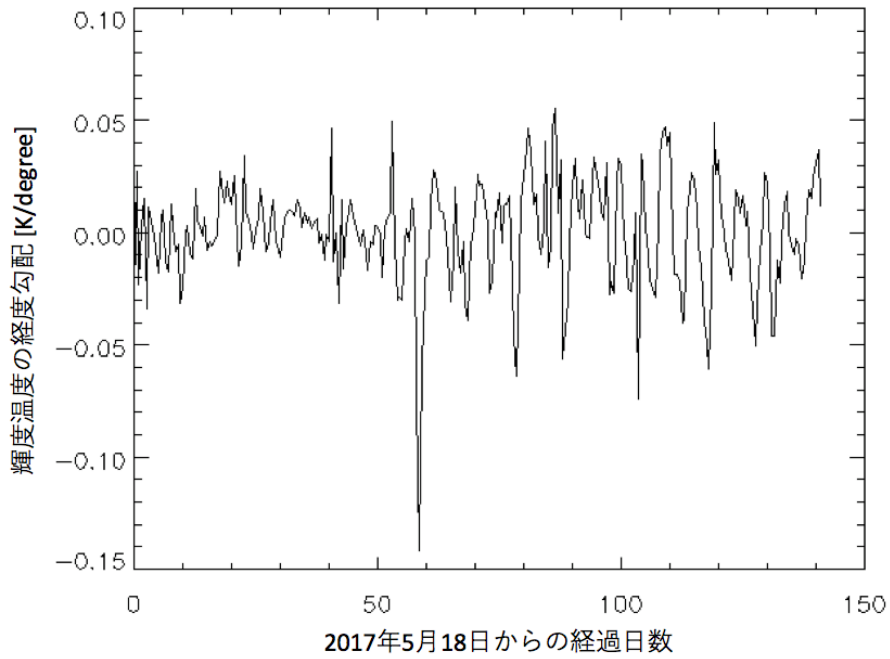
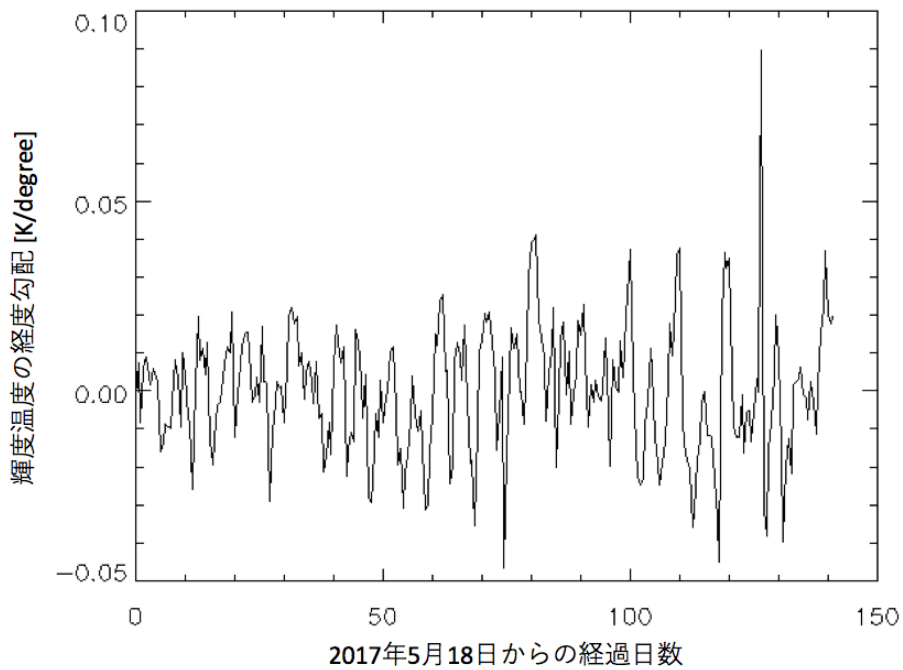


図 4.3： 出射角 40-60°のデータを用いて導出した(a) 50°N, (b) 40°N, (c) 30°N, (d) 20°N, (e) 10°N, (f) 赤道上, (g) 10°S, (h) 20°S, (i) 30°S, (j) 40°S, (k) 50°S における輝度温度勾配の時系列から長周期成分を除いたもの。

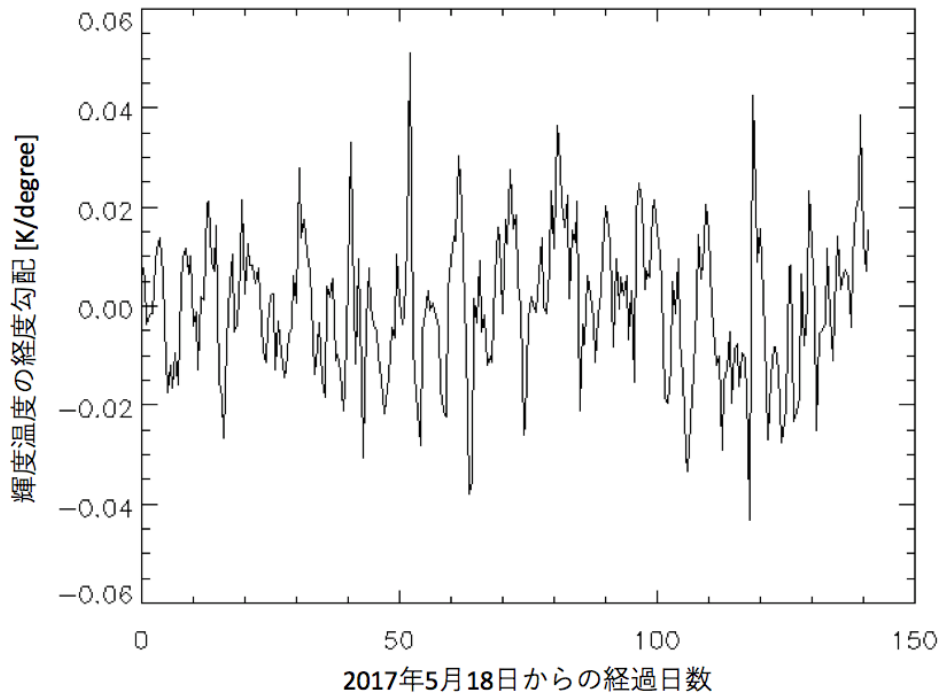
(a) 50°N



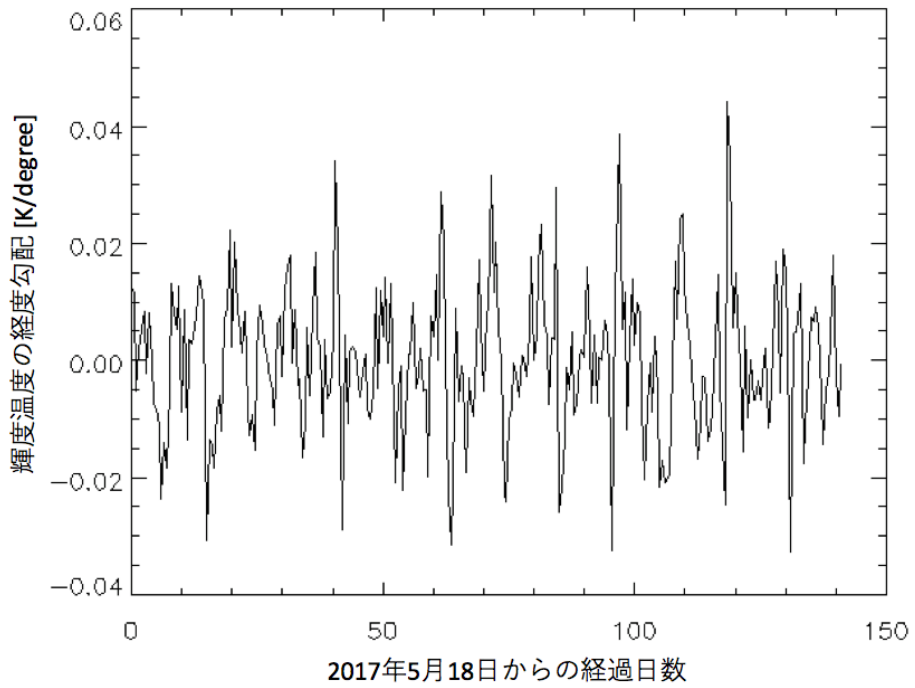
(b) 40°N



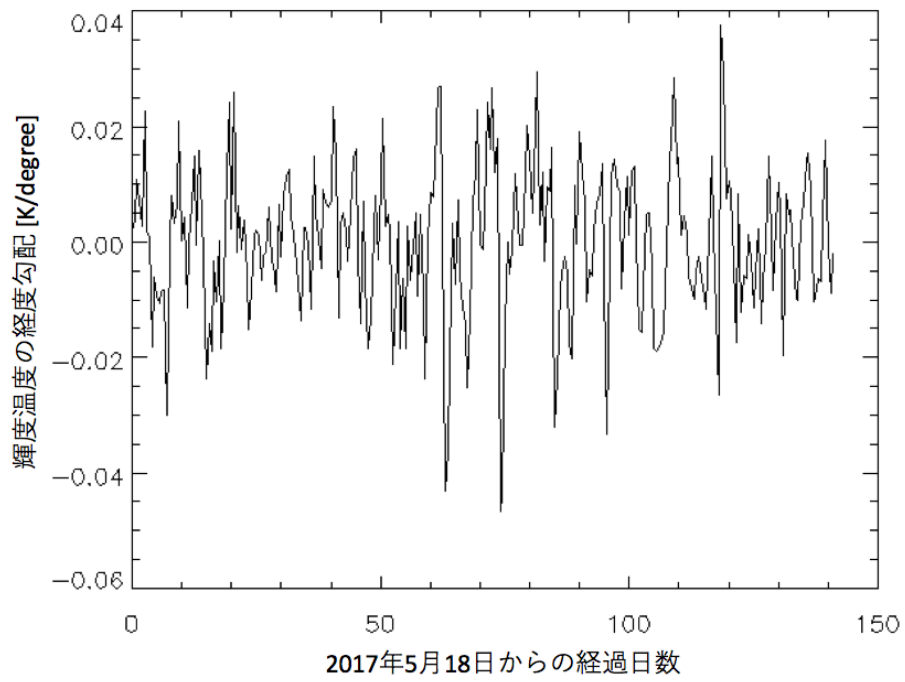
(c) 30°N



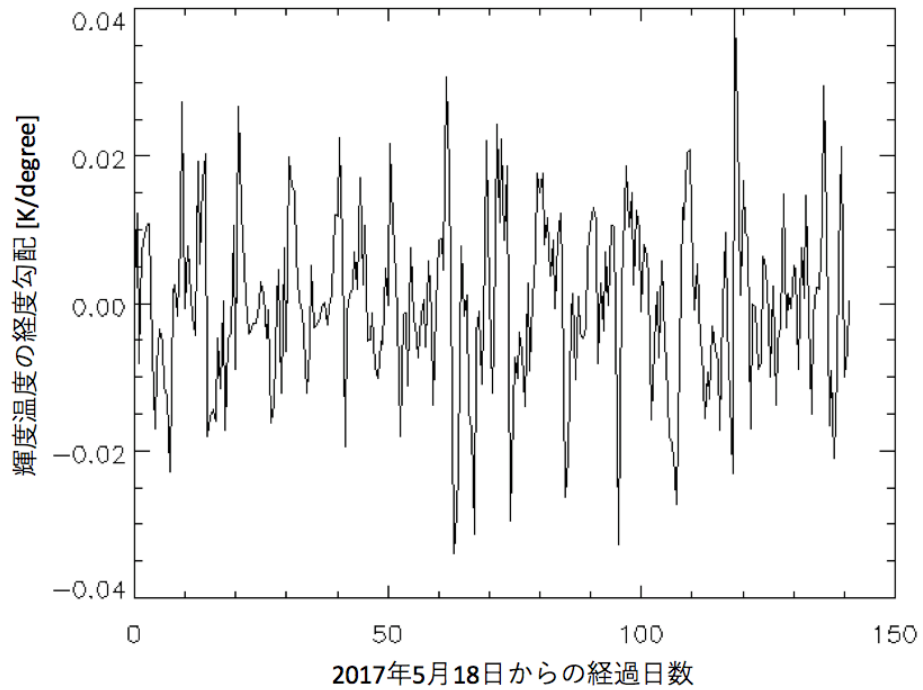
(d) 20°N



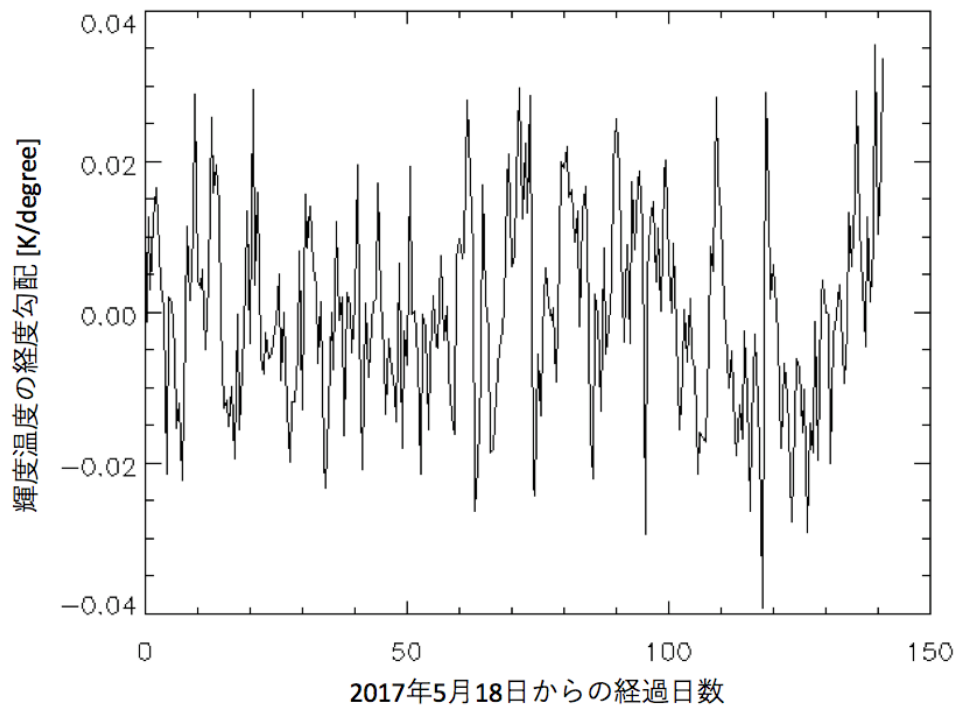
(e) 10°N



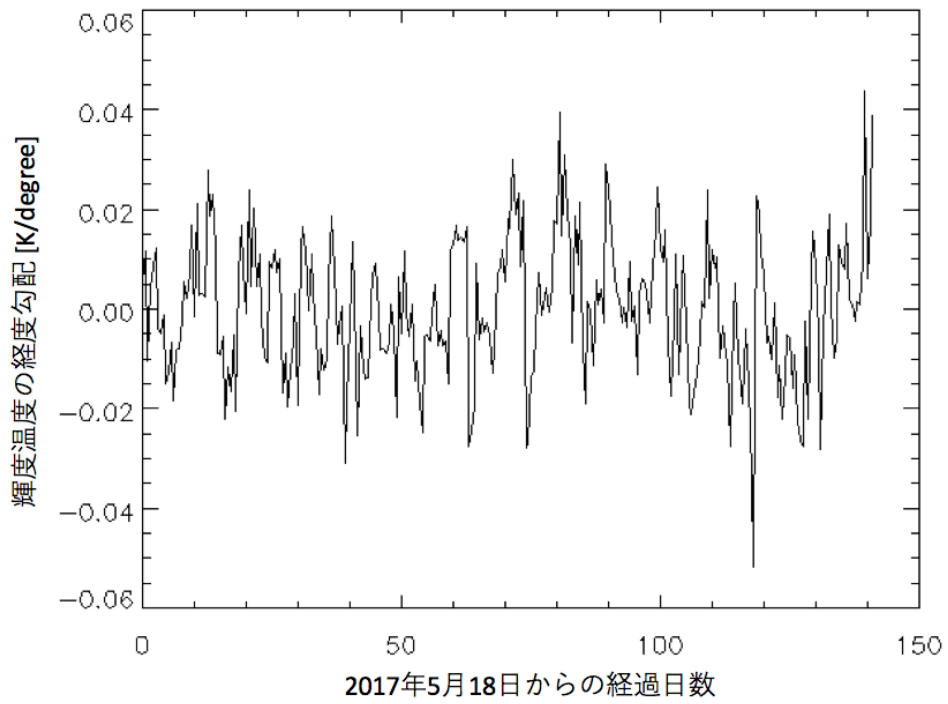
(f) 赤道上



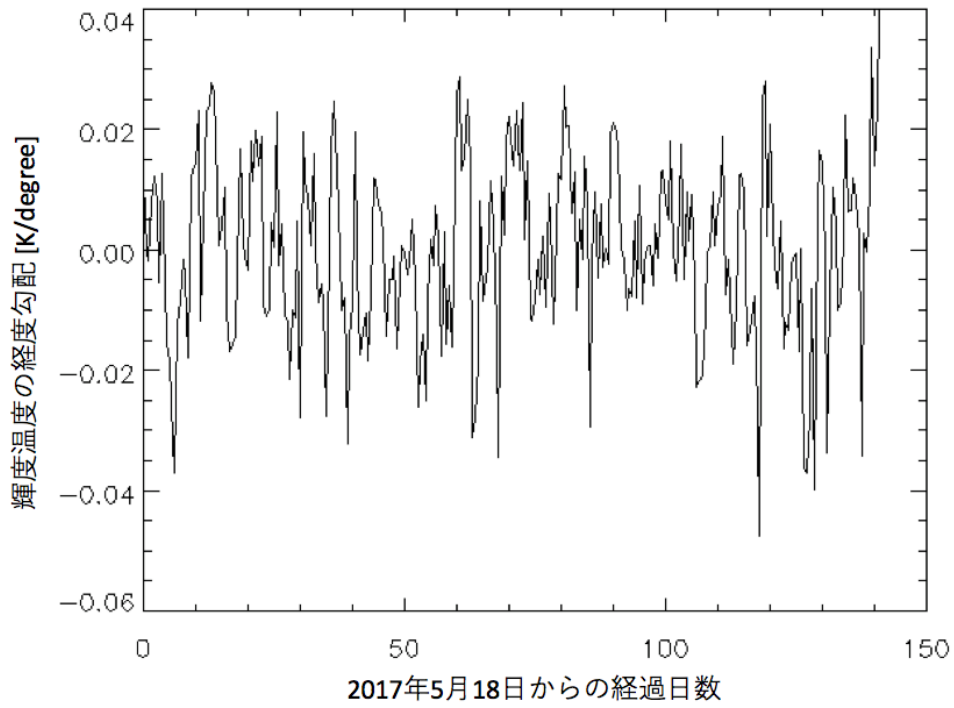
(g) 10°S



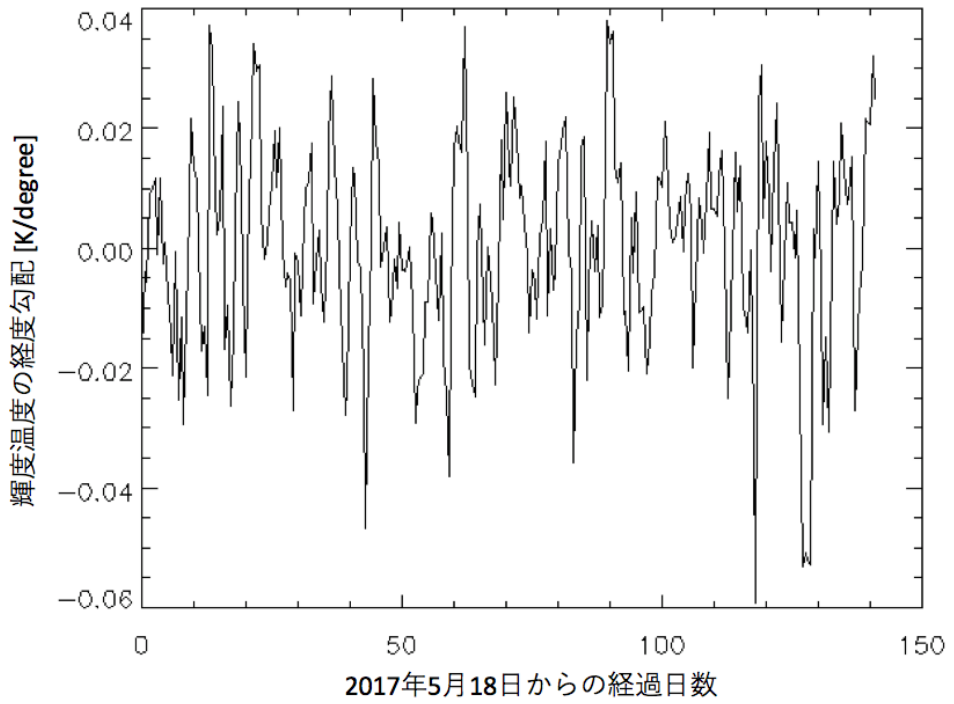
(h) 20°S



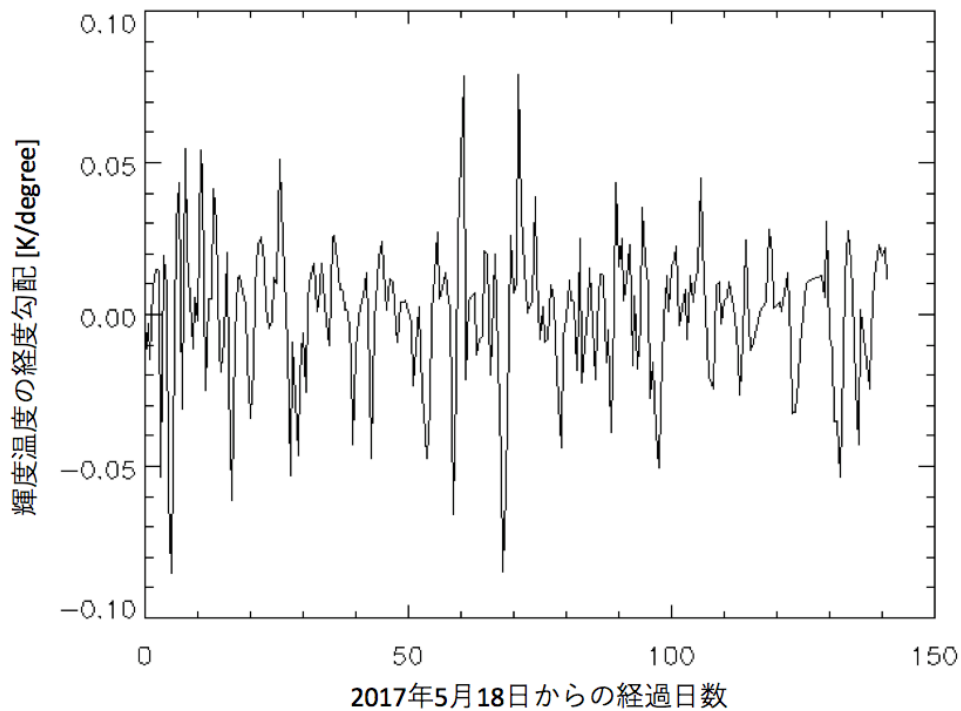
(i) 30°S



(j) 40°S



(k) 50°S

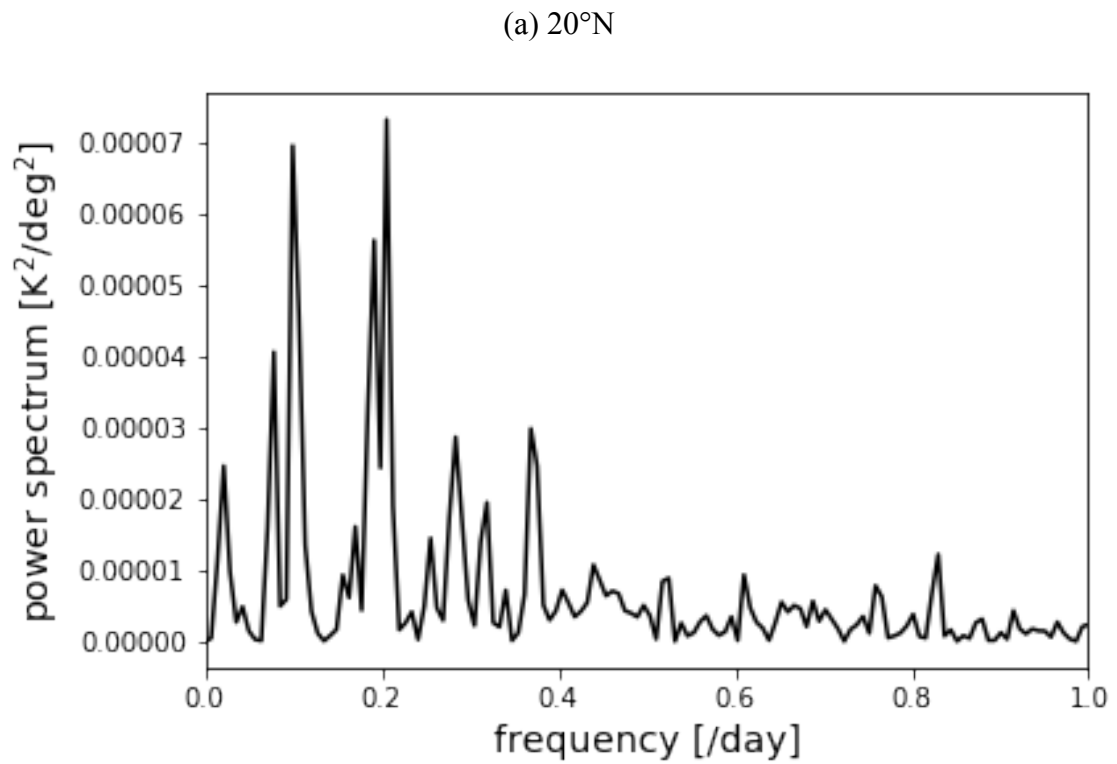


4.2 結果

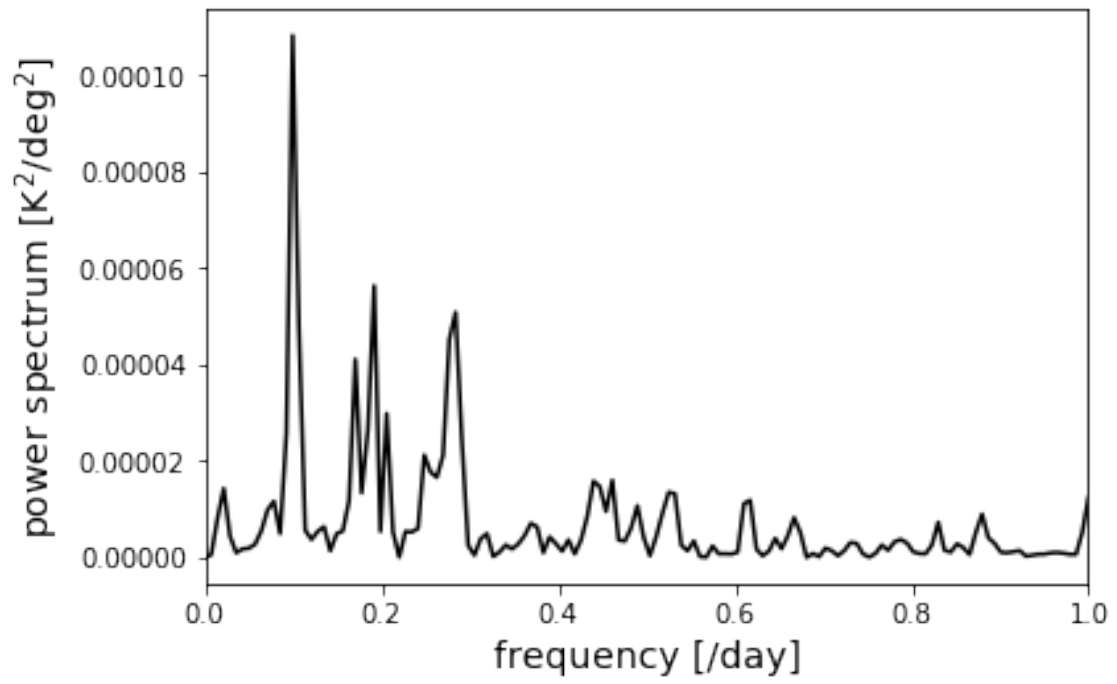
図 4.2, 4.3 に示した各時系列データに関して FFT を行った. その結果を図 4.4, 4.5 に示す. どの緯度にもいくつかの顕著なピークが見られることがわかった. 周波数 0.010 day^{-1} 程度のピークは多項式フィッティングで除去しきれなかった長周期成分で, 探査機の遠金点の位置のおよそ 200 日周期の変化と熱潮汐波に起因する成分であることが考えられる. 周波数 0.10 day^{-1} に見られるピークは, あかつきが周期約 10.8 日で周回していることと, 熱潮汐波の存在によって作られると考えられる.

本研究ではより高周波の成分に注目する. 赤道上では周波数約 0.28 day^{-1} すなわち周期約 3.5 日の成分が顕著なピークを持っていることがわかる. この周波数の成分は南北 30° まではピークを持つように見えるがより高緯度では目立たなくなる. 周波数約 0.21 day^{-1} すなわち周期約 4.9 日の成分は赤道から南北高緯度に向かってより顕著なピークが目立つようになることが見て取れる. また, 周期約 0.19 day^{-1} すなわち周期約 5.2 日の成分も存在し, これは広い緯度帯で似た振幅を持つ.

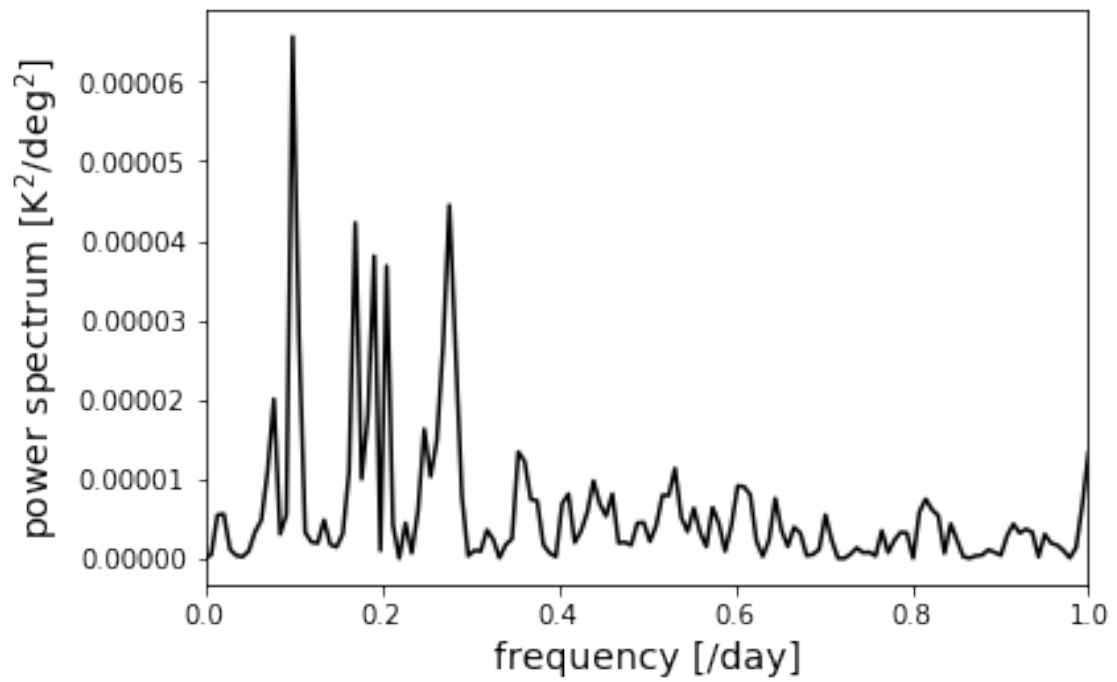
図 4.4 : 出射角 20-40°のデータを用いて導出した(a) 20°N, (b) 10°N, (c) 赤道上, (d) 10°S, (e) 20°S における輝度温度勾配の時系列の FFT パワースペクトル.



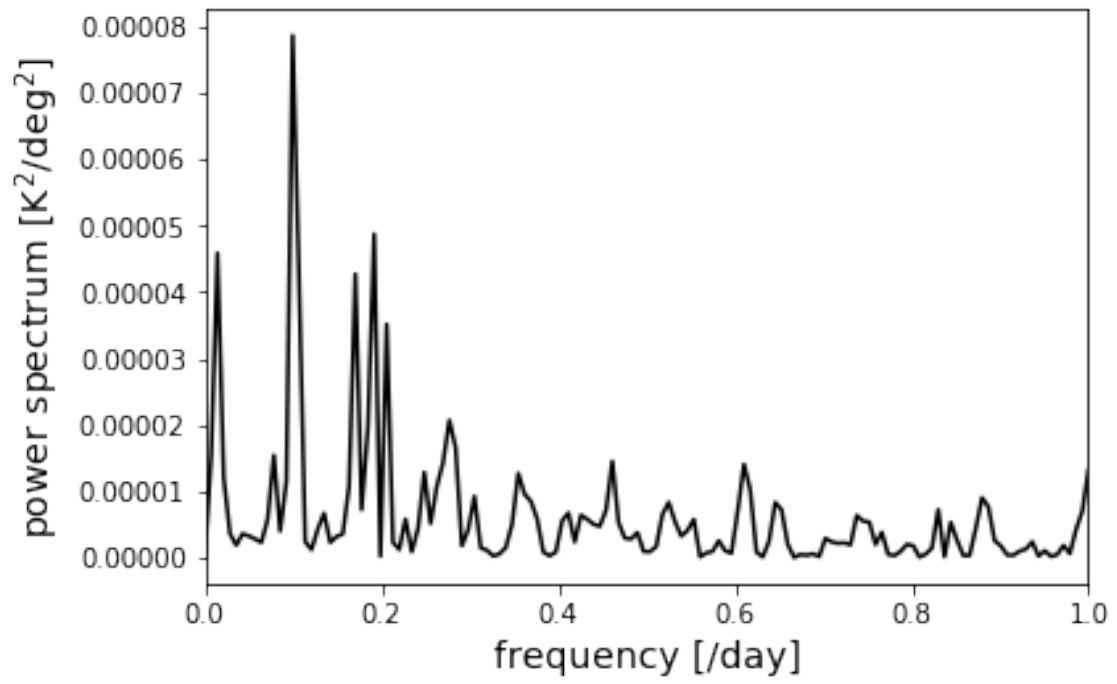
(b) 10°N



(c) 赤道上



(d) 10°S



(e) 20°S

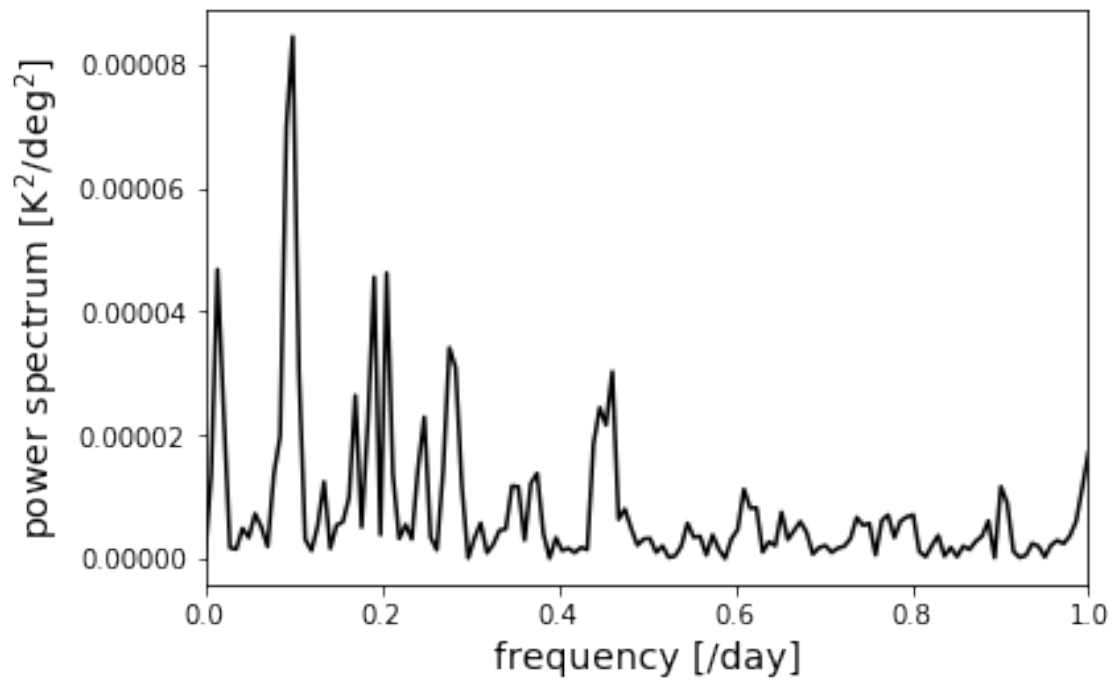
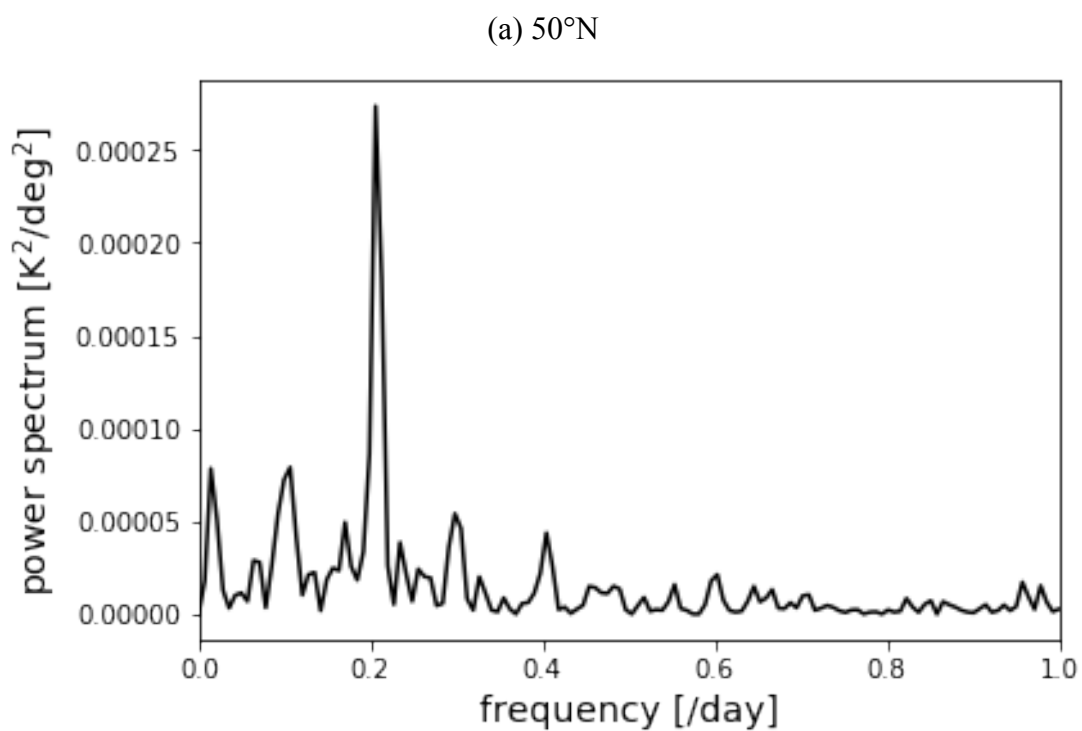
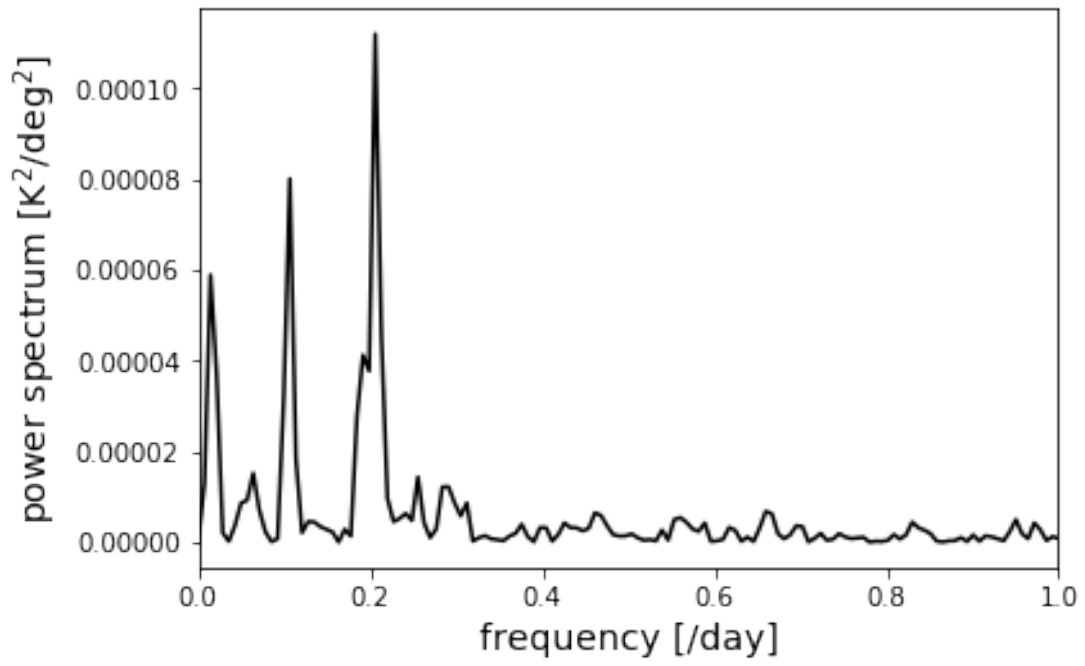


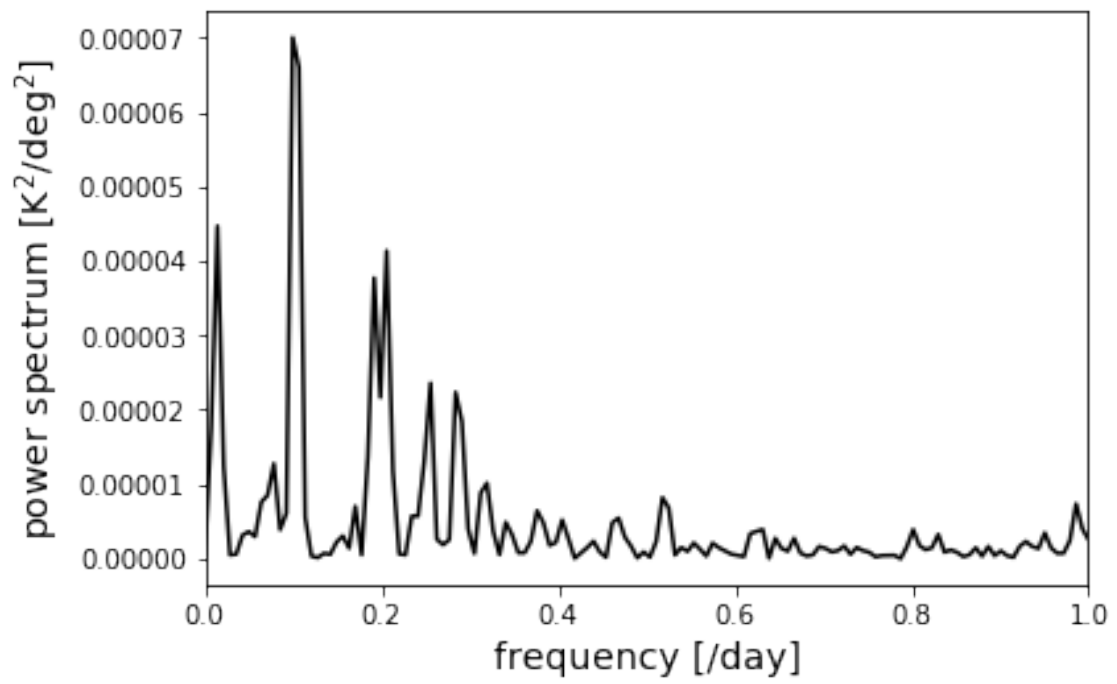
図 4.5 : 出射角 40-60° のデータを用いて導出した(a) 50°N, (b) 40°N, (c) 30°N, (d) 20°N, (e) 10°N, (f) 赤道上, (g) 10°S, (h) 20°S, (i) 30°S, (j) 40°S, (k) 50°S における輝度温度勾配の時系列の FFT パワースペクトル.



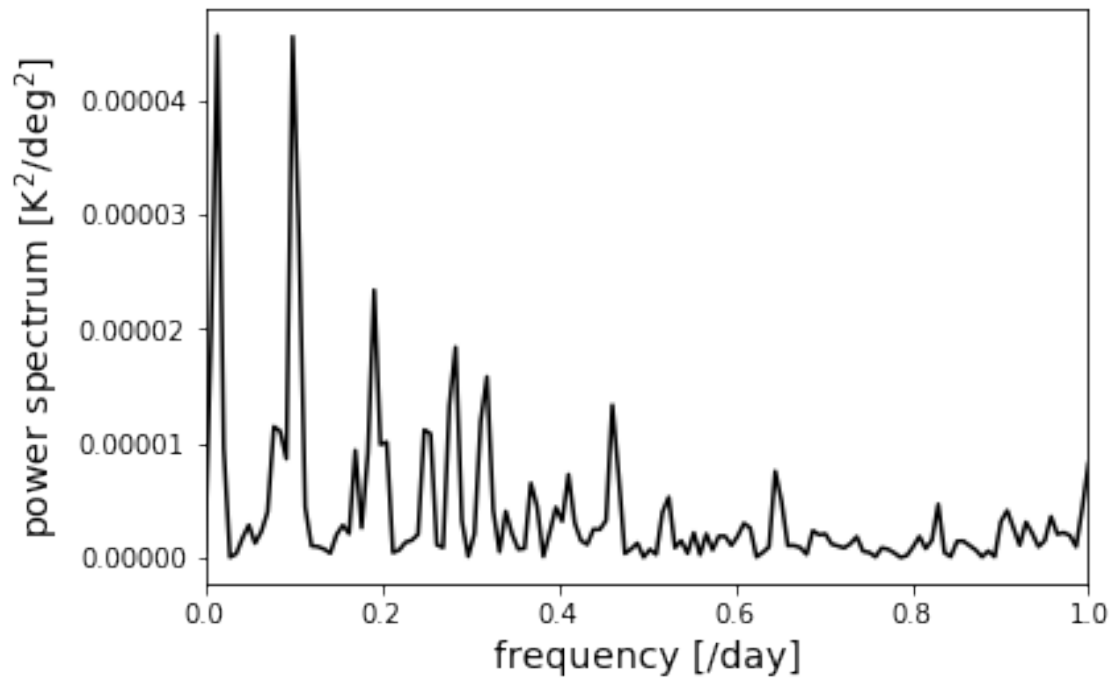
(b) 40°N



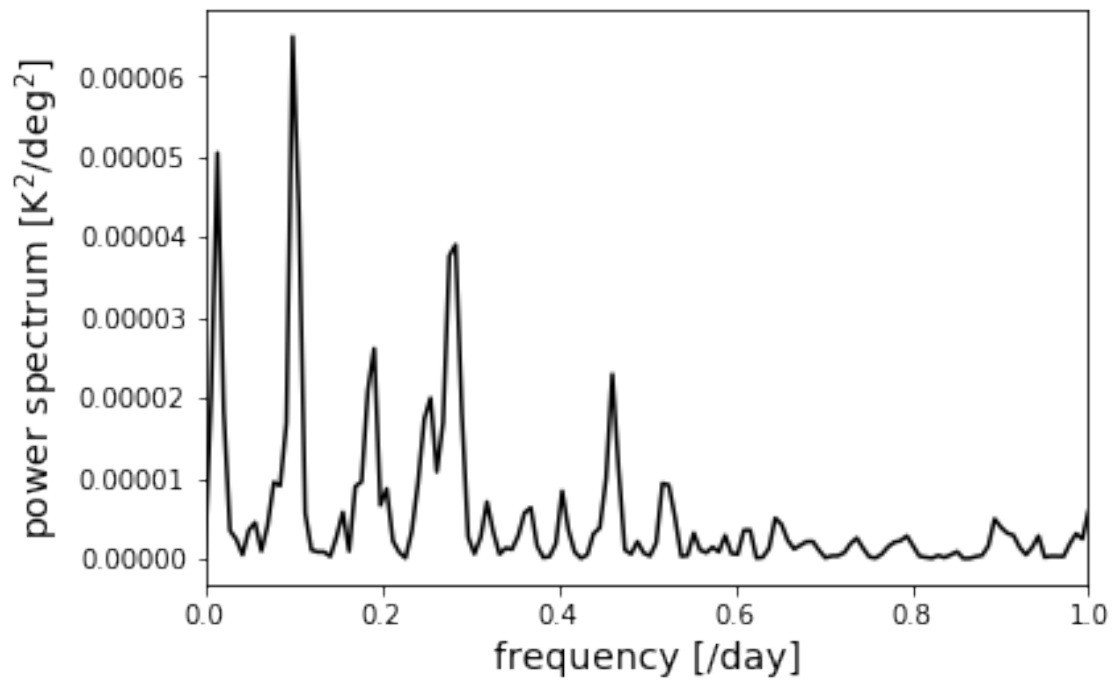
(c) 30°N



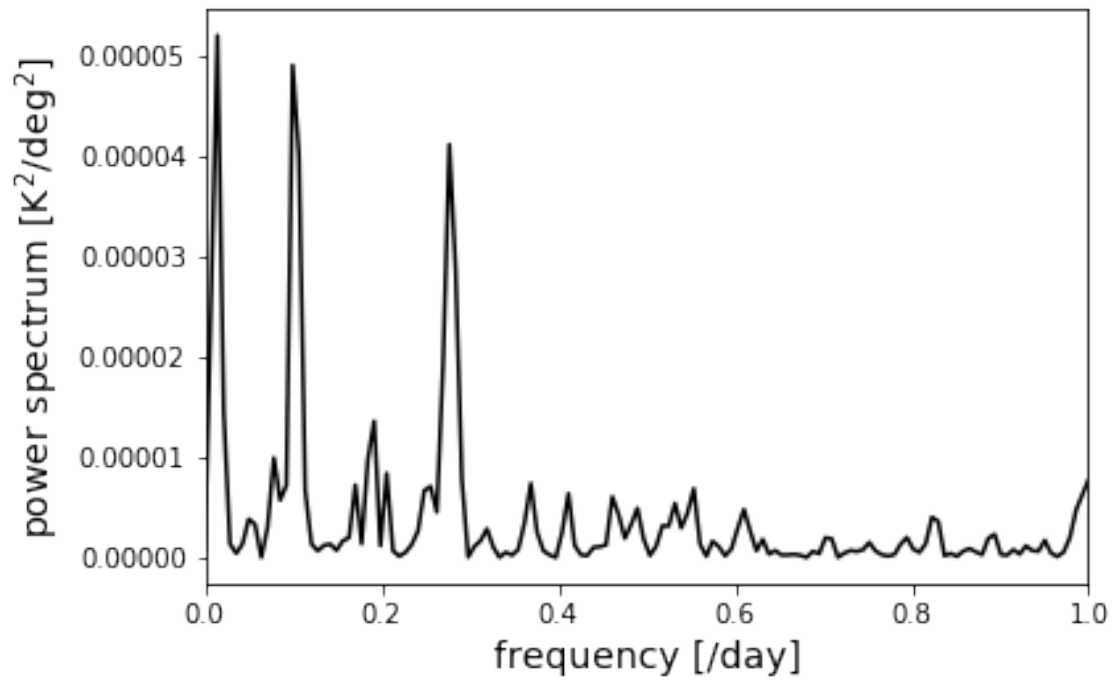
(d) 20°N



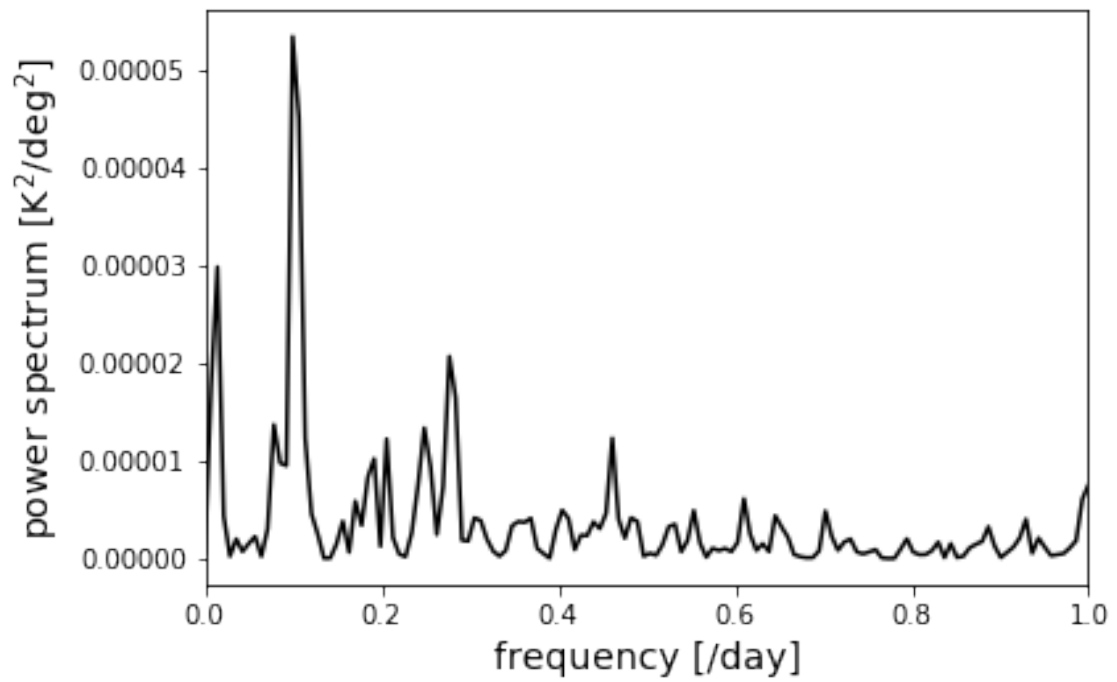
(e) 10°N



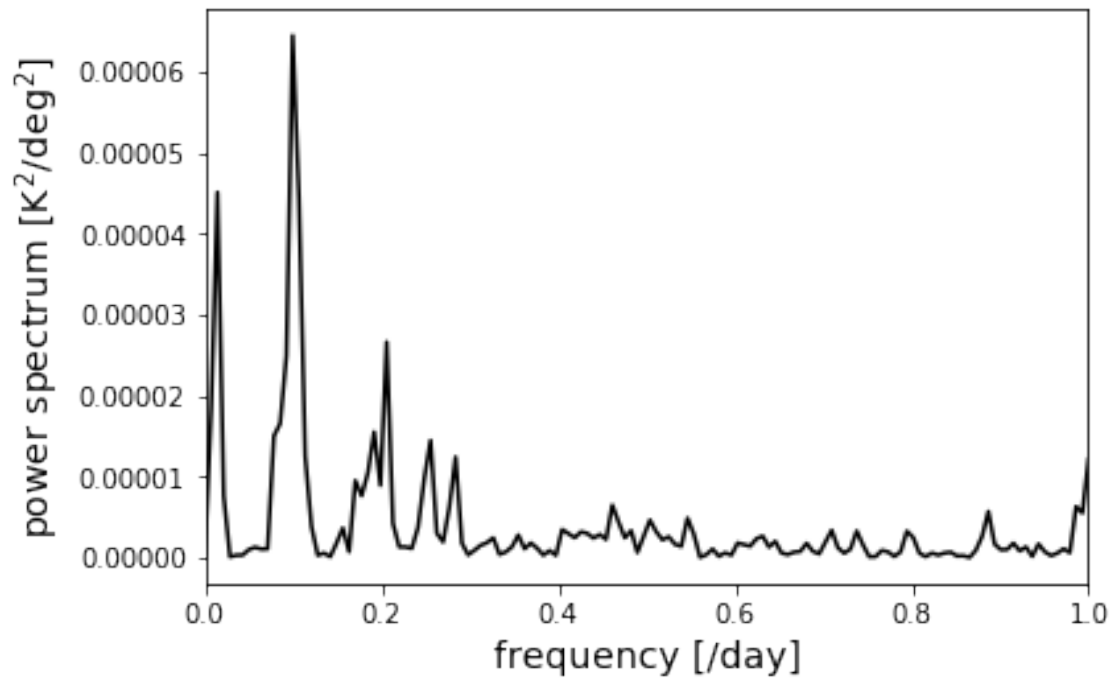
(f) 赤道上



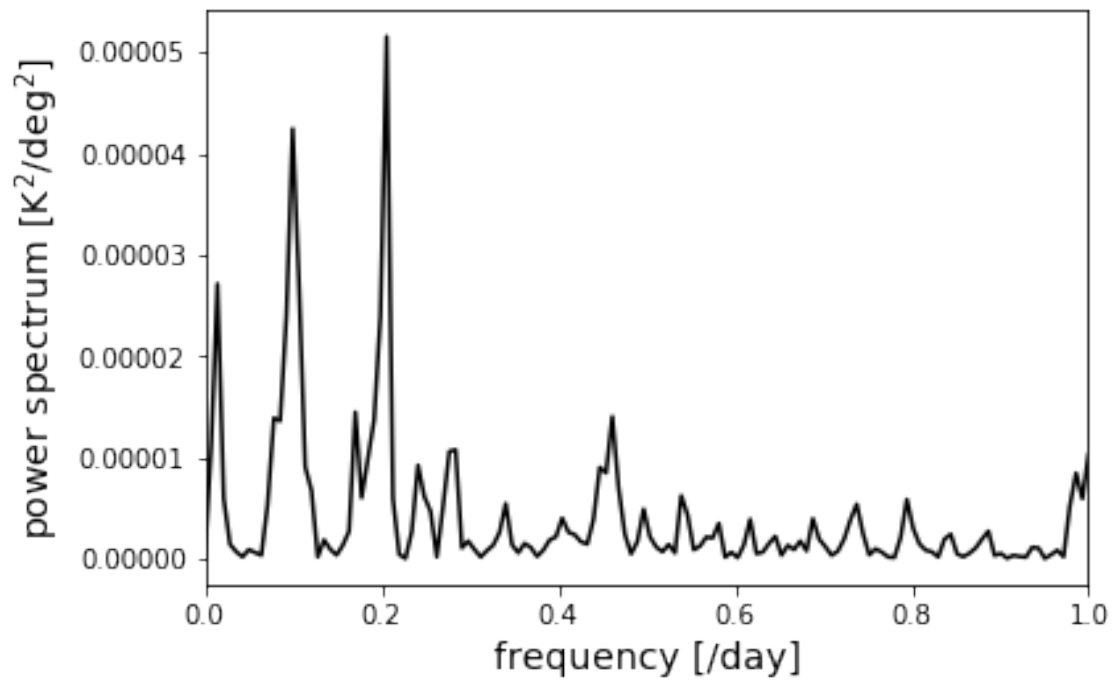
(g) 10°S



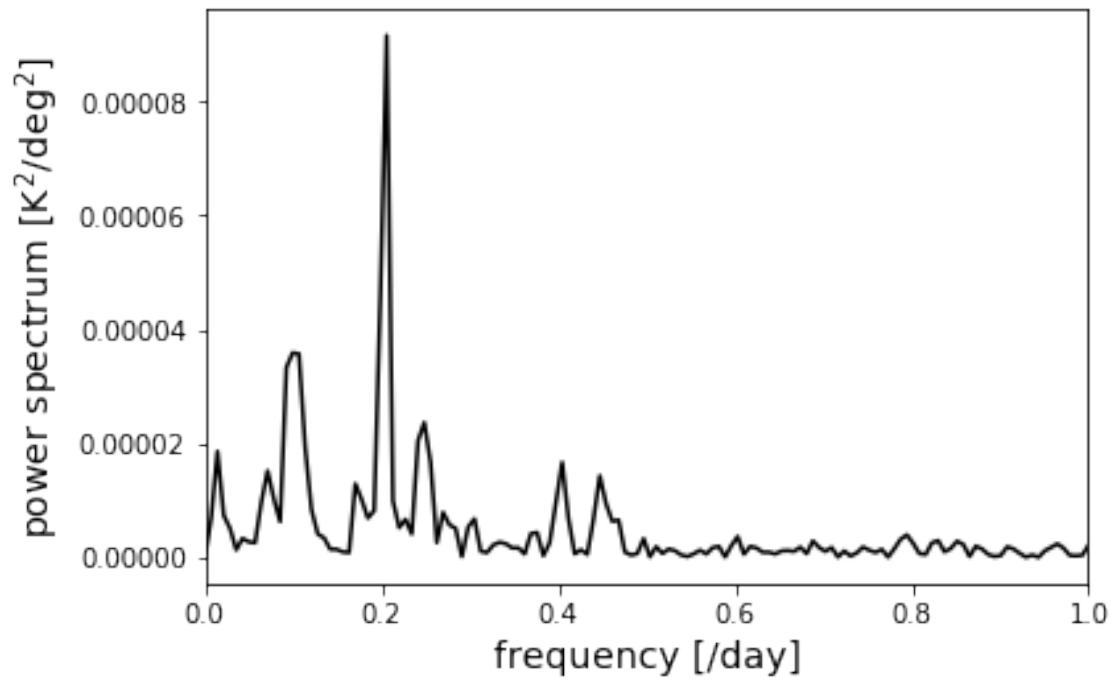
(h) 20°S



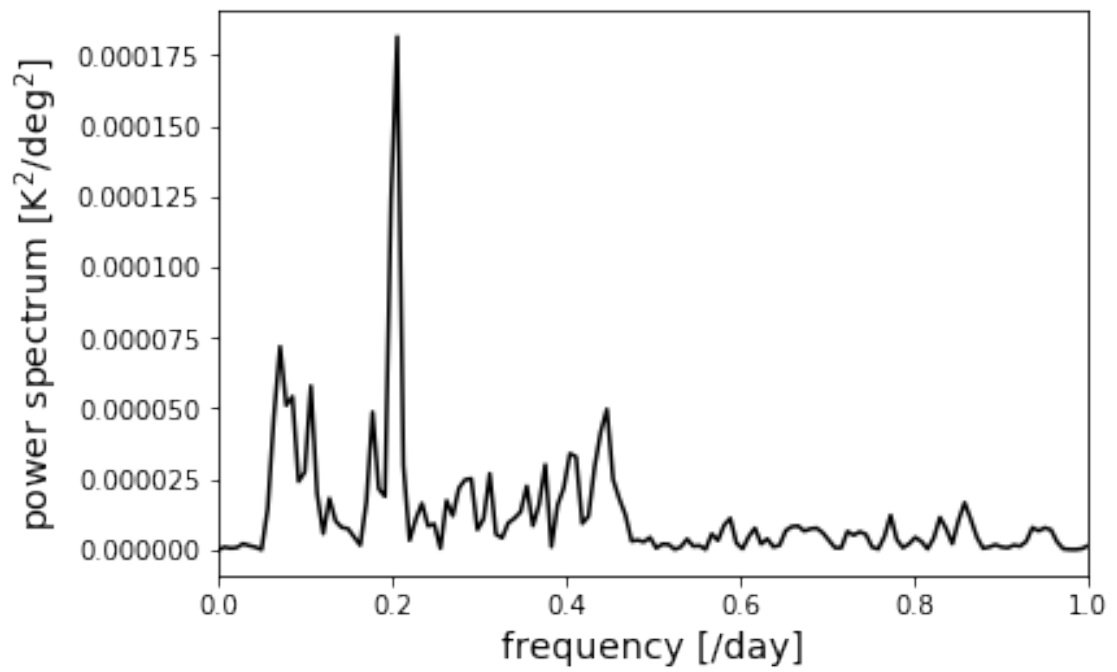
(i) 30°S



(j) 40°S



(k) 50°S



4.3 探査機の軌道運動の影響

前述したようにあかつきは周期約 10.8 日で長楕円軌道を周回している。輝度温度勾配を計測する緯度が時間とともに移動するため、観測された変動周期はその影響を受けていることが考えられる。そこで、その影響がどれほどであるか見積もりを行なった。金星上で振幅 1.0、東西波数 1.0、周期 5.0 日の正弦波が西向きに伝搬していると仮定し、2017 年 5 月 18 日から 12 時間おきに 143 日間のあかつきの軌道データを用いてその波が探査機直下でどのように観測されるかを図 4.6 に示す。図 4.6 では見やすさのために 80 日目までをプロットしている。この擬似データを FFT した結果を図 4.7 に示す。その結果を見ると周波数 0.20 day^{-1} つまり周期 5 日のところにピークがあり、周波数分解能 0.0070 day^{-1} の範囲では仮定した波の周波数 0.20 day^{-1} からずれていないことがわかった。あかつきは軌道運動の遅い遠金点付近で軌道周期のうちのほとんどの時間を過ごし、近金点を短時間で通過したあと再びほぼ同じ遠金点の位置に戻ってくる。そのため、観測される波の位相は近金点付近を通る際に変調を受けるものの、観測期間全体では大きな影響を受けず、観測期間全体でのサイクル数がほとんど変わらないと考えられる。

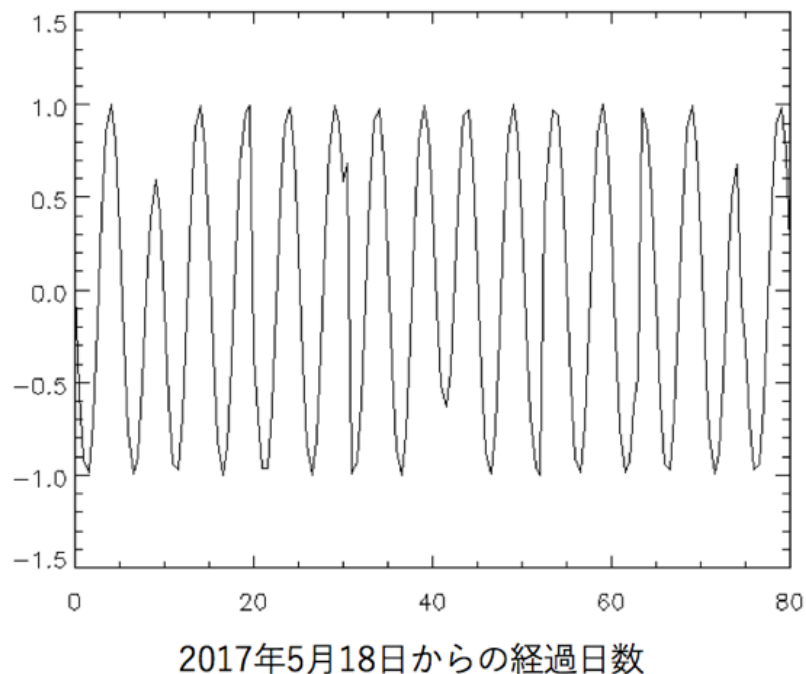


図 4.6：軌道上から観測される仮想的な周期 5.0 日、波数 1.0 の波の時系列データ

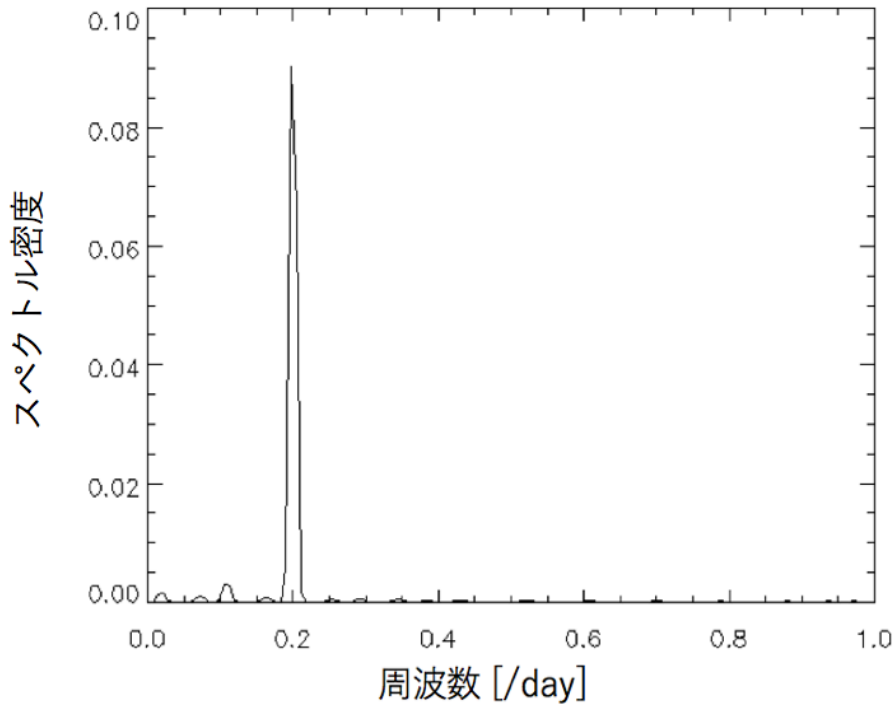


図 4.7: 上記の時系列データの FFT スペクトル

4.4 振幅と位相の緯度構造

次に波の振幅と位相の緯度構造について考察する．複数の緯度に渡って顕著なピークが見られた周期 3.5 日，4.9 日，5.2 日の成分について FFT の結果を用いて輝度温度勾配の振幅と位相を求める．次に，式(3.1)を用いて輝度温度の振幅を求める．以上のようにして求めた輝度温度の振幅と位相を図 4.8，4.9，4.10 に示す．

振幅の誤差としては、各緯度において顕著なピークが見られない周波数成分の振幅の 2 乗平均の平方根 (RMS) を採用した．位相の誤差は次のように与えられる．各時刻における (複素) 信号ベクトル S_s と誤差ベクトル S_n のなす角を β 、信号振幅を $|S_s|$ 、誤差の大きさを $|S_n|$ とすると、その時の位相誤差 α は以下のようになり

$$\alpha = \frac{|S_n|}{|S_s|} \sin \beta \quad (4.4)$$

β は $0 \sim 2\pi$ に同じ確率で分布するとして、位相誤差は α の RMS で求めることができ (4.5) のように得られる.

$$\delta\alpha = \left(\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \alpha^2 d\beta \right)^{1/2} = \frac{|S_n|}{\sqrt{2}|S_s|} \quad (4.5)$$

このようにして各緯度で求めた振幅と位相の誤差をエラーバーとして用いた.

周期 3.5 日の成分に着目すると、振幅は低緯度で大きくなり高緯度になるにつれ南北対称に小さくなる様子がわかる. 周期がスーパーローテーションの平均的な循環周期 4.0 日よりも短いことと、このような振幅の緯度構造からこれは Kelvin 波である可能性がある. また、位相は南北対称にずれていくこと様子が見て取れる. 本研究ではこの位相のずれの原因はわからないが、背景大気の流れや温度などの条件が一様でないためにこのように等位相面が南北対称に傾いている可能性があり、興味を引く結果である. これの追求は今後の課題として残る部分である.

次に周期 4.9 日の成分に着目すると振幅は南北対称に高緯度に向かって大きくなっていることがわかる. 位相に関しても低緯度を除きおおむね揃っていることがわかる. 周期がスーパーローテーションの周期 4.0 日よりも長いことも踏まえると、これは図 1.8 で期待されていた南北対称モードの Rossby 波である可能性がある.

周期 5.2 日の成分は振幅も位相も緯度によってあまり変化がない. 周期から Rossby 波に対応するものと考えられるが、同定のためにはさらなる調査が必要である.

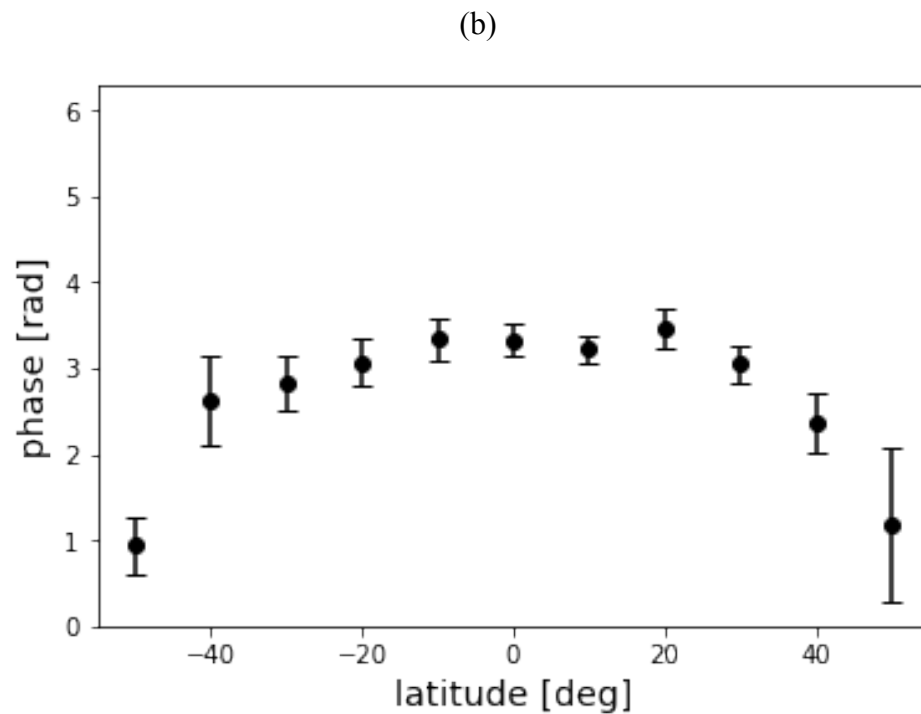
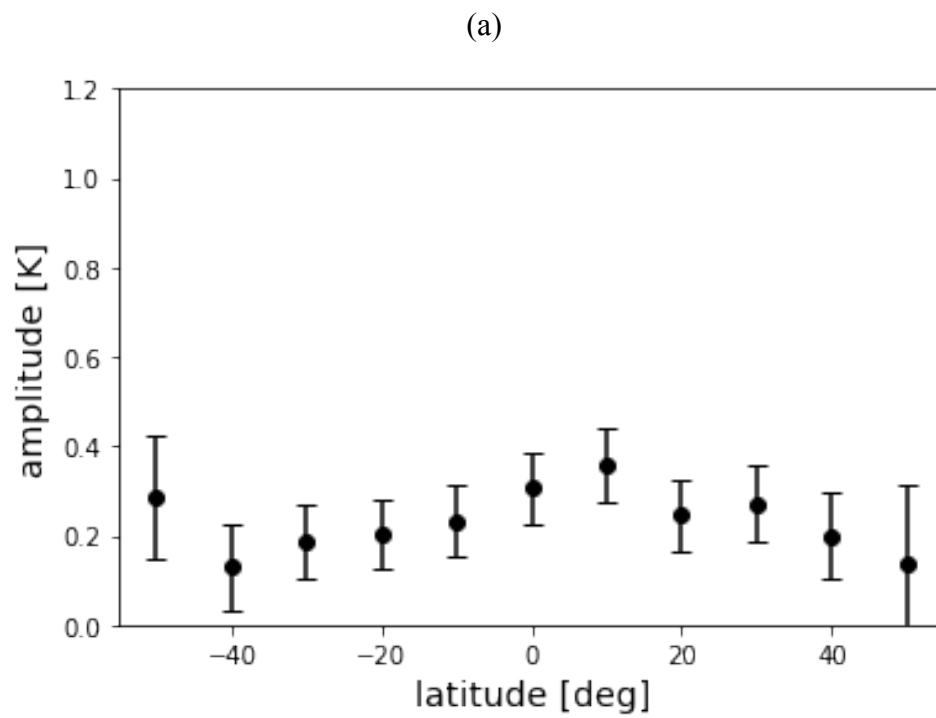
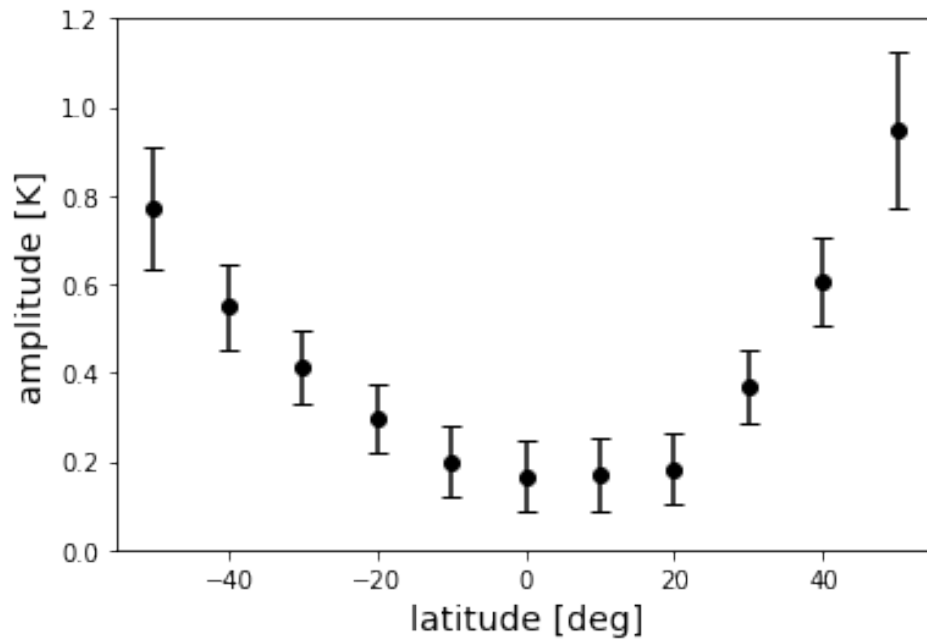


図 4.8：出射角 $40\text{-}60^\circ$ のデータを用いて導出した周期 3.5 日の成分の (a) 振幅, (b) 位相の緯度構造. 横軸は北緯を正とした.

(a)



(b)

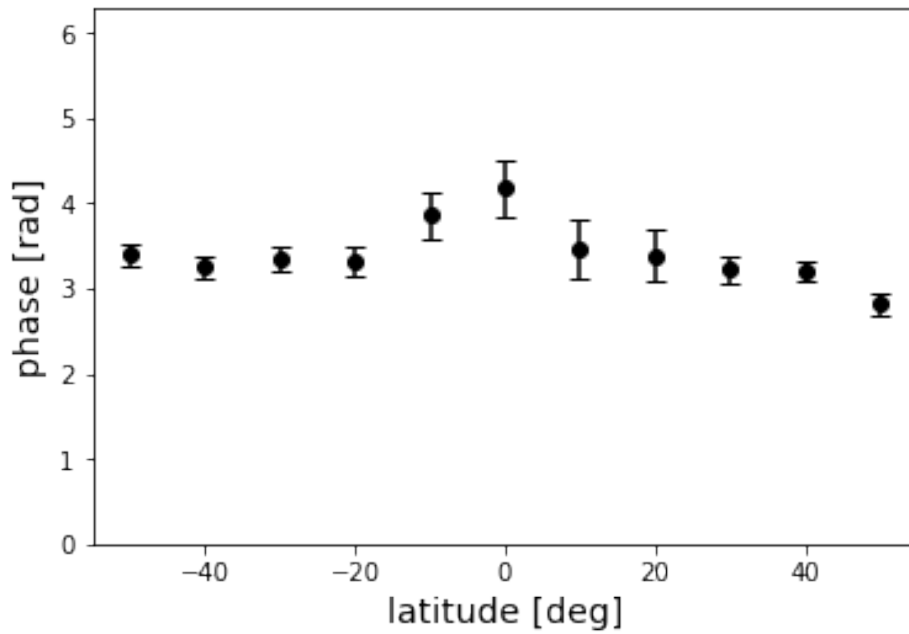


図 4.9： 出射角 $40\text{-}60^\circ$ のデータを用いて導出した周期 4.9 日の成分の (a) 振幅, (b) 位相の緯度構造. 横軸は北緯を正とした.

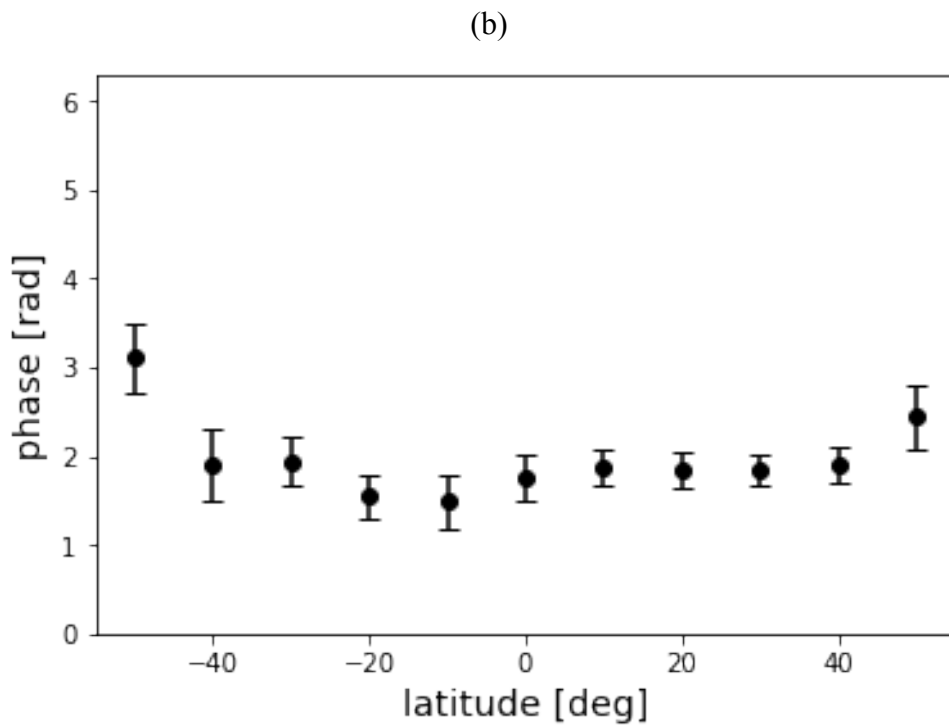
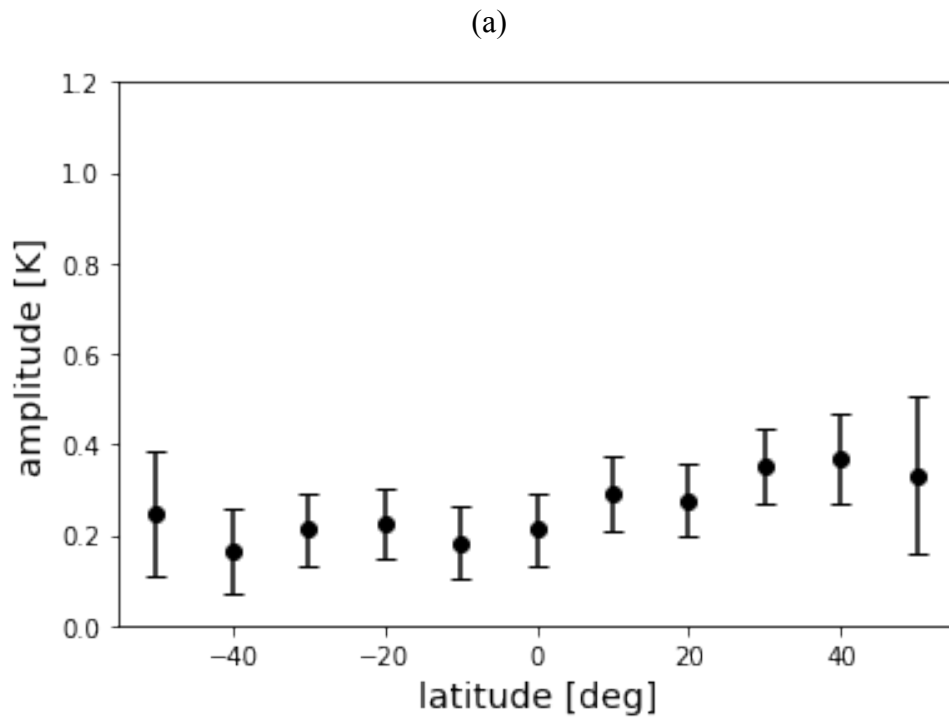


図 4.10： 出射角 $40\text{-}60^\circ$ のデータを用いて導出した周期 5.2 日の成分の (a) 振幅, (b) 位相の緯度構造. 横軸は北緯を正とした.

5. wavelet解析

Fourier 解析によって波の振幅および位相の緯度構造を調べることができた。しかし Fourier 解析では周波数の関数としてスペクトルを得ているため時間の情報が失われている。図 1.6 で示したように Pioneer Venus で計測された紫外輝度の変動に見られる周期成分の振幅や緯度分布は観測時期によって異なることがわかっている。つまり、本研究で捉えた輝度温度変動も定常的に存在しているわけではなく時間変化していることが考えられる。そのような変動は惑星スケールの波動の励起に関わる大気力学のエネルギーサイクルの手がかりになりうるため本章ではその時間変化の解析について述べる。

5.1 短時間 Fourier 変換と wavelet 変換

スペクトルの時間変化を解析する手法として短時間 Fourier 変換と wavelet 変換がよく知られている。短時間 Fourier 変換では窓関数を用いて信号の一部を切り出し、その窓関数をずらしながら Fourier 変換を行うことによってスペクトルの時間変化を捉える。窓関数を変化させずに解析を行うため解析結果の時間分解能、周波数分解能は用いる窓関数の大きさに依存する。窓関数を広くすると周波数分解能は良くなるが時間分解能は悪くなる。逆に窓関数を狭くすると周波数分解能は悪くなるが時間分解能は良くなる。周期の長い成分ほど窓関数が狭くないと適切に周期成分を取り出すことができないが短時間 Fourier 変換ではそのような窓関数の調節はできない。一方、wavelet 変換では窓関数の幅を変えながら周期解析を行うことができる。そのため本研究では wavelet 変換を用いて輝度温度勾配の時間周波数解析を行った。

5.2 解析方法

wavelet 変換とは式(5.1)で定義されるものであり、解析対象の波形を sin 波と cos 波の足し合わせとして表現していた Fourier 変換とは異なり、 $\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$ で表されるマザーウェーブレットと呼ばれる基底関数の足し合わせで表現するものである。

$$(W_{\psi}f)(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (5.1)$$

ここで a は scale, b は translation と呼ばれそれぞれ周波数の逆数, 時間に相当する. これらを変化させることによってマザーウェーブレットを伸縮させることができる. マザーウェーブレットには様々な種類があるが本解析では Torrence & Compo (1998) による解析ツールを用いており, この解析ツールでは Morlet 関数をマザーウェーブレットとして用いている. Morlet 関数の定義を式(5.2)に, 形を図 5.1 に示す. Morlet 関数は引数ゼロに対して対称な複素関数である.

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega t} e^{-t^2/2} \quad (5.2)$$

ここで ω は無次元周波数を表しており本解析では広く用いられている $\omega=6$ を採用した.

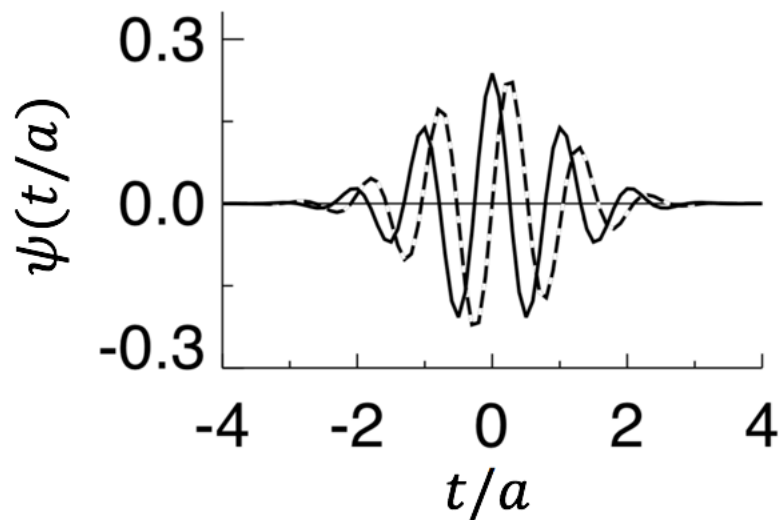


図 5.1 Morlet 関数 (Torrence & Compo, 1998)

実線が実部を破線が虚部を表している.

ここで a はスケールであり, $a = 10\delta t$ とした.

また, この解析ツールで得られるウェーブレットスペクトルのパワーは白色雑音プロセスの場合に 1 になるように規格化されている.

5.3 解析結果および考察

4章に示した輝度温度勾配の時系列について解析を行った。出射角 20-40°から求めた結果については図 5.2 に、出射角 40-60°から求めた結果については図 5.3 に示す。コンターは標準偏差が 1 となるように規格化したウェーブレットパワースペクトルを示している。周期 10 日以上では軌道運動の成分など興味の無いピークが生じるので周期 8.0 日以下のみをプロットした。ハッチがけされている部分はマザーウェーブレットをずらして解析をしている際に、マザーウェーブレットが元の時系列データの両端いずれかからはみ出したところを表しており、結果が信頼出来ない部分である。また黒い等高線は 90%信頼区間を表している。wavelet 変換では窓関数の幅を調節しデータの一部を切り取りながら解析を行うため、解析区間全てのデータを用いて周期解析を行う FFT と比べると解析結果の周期成分の極大が周波数方向に広がって見える。

この結果を見ると FFT では捉えられなかった輝度温度勾配の変動の時間情報が得られたことがわかる。FFT において顕著なピークが見られた 3.5 日や 4.9 日周期の波動は wavelet 解析では明瞭に別れては見え、また、観測期間全てに卓越しているわけではないことが見て取れる。そのうえで、約 5.0 日周期の成分は 50-80 日目、100-130 日目あたりで大きくなるように見え、周期 3.5 日に対応する成分は間欠的に認められるが時間変化の傾向ははっきりしない。wavelet スペクトルにおいて明瞭なピークを連続的に確認しにくい理由として、wavelet 関数の幅が短いために、対象としている 3.0-5.0 日周期の波動とは別の局所的・突発的な擾乱の影響を受けやすい、ということもあるかもしれない。

出射角 40-60°のデータを用いて導出した結果では南北 20°までは周期 4.0 日以下の比較的短い周期の変動が目立ち、南北 30°-50°ではそれらの変動が目立たなくなり、周期 5.0 日程度の変動が目立つようになることが見て取れる。例えば南北 40°に注目すると、約 40-60 日、約 110-130 日の範囲で周期約 5.0 日の変動が卓越している。次に南北 50°に着目すると、約 50-70 日、約 90-110 日の範囲で同様に周期約 5.0 日の変動が卓越している。これらのように中緯度では南北同緯度を比較するとおおむね同じ時期に同じ周期の変動が存在することが明らかになった。これは図 1.8 の期待されている波の水平構造、4章で述べた波の水平緯度構造を支持する結果であり、本解析で検出された周期約 5.0 日の成分の変動は南北対称の Rossby 波であることがこの結果からも推察される。

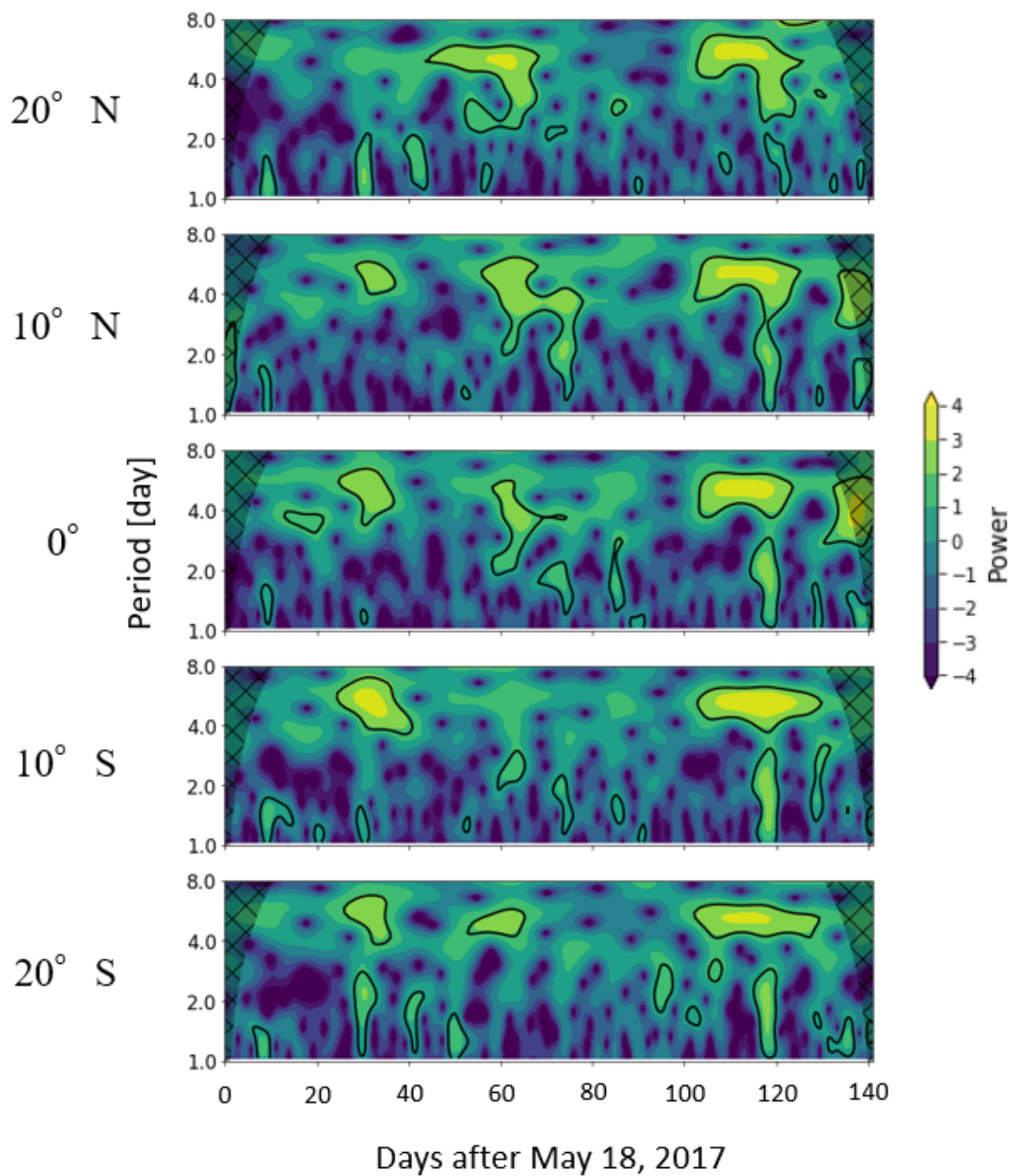


図 5.2 : 出射角 20-40°のデータを用いて導出したウェーブレットパワースペクトル

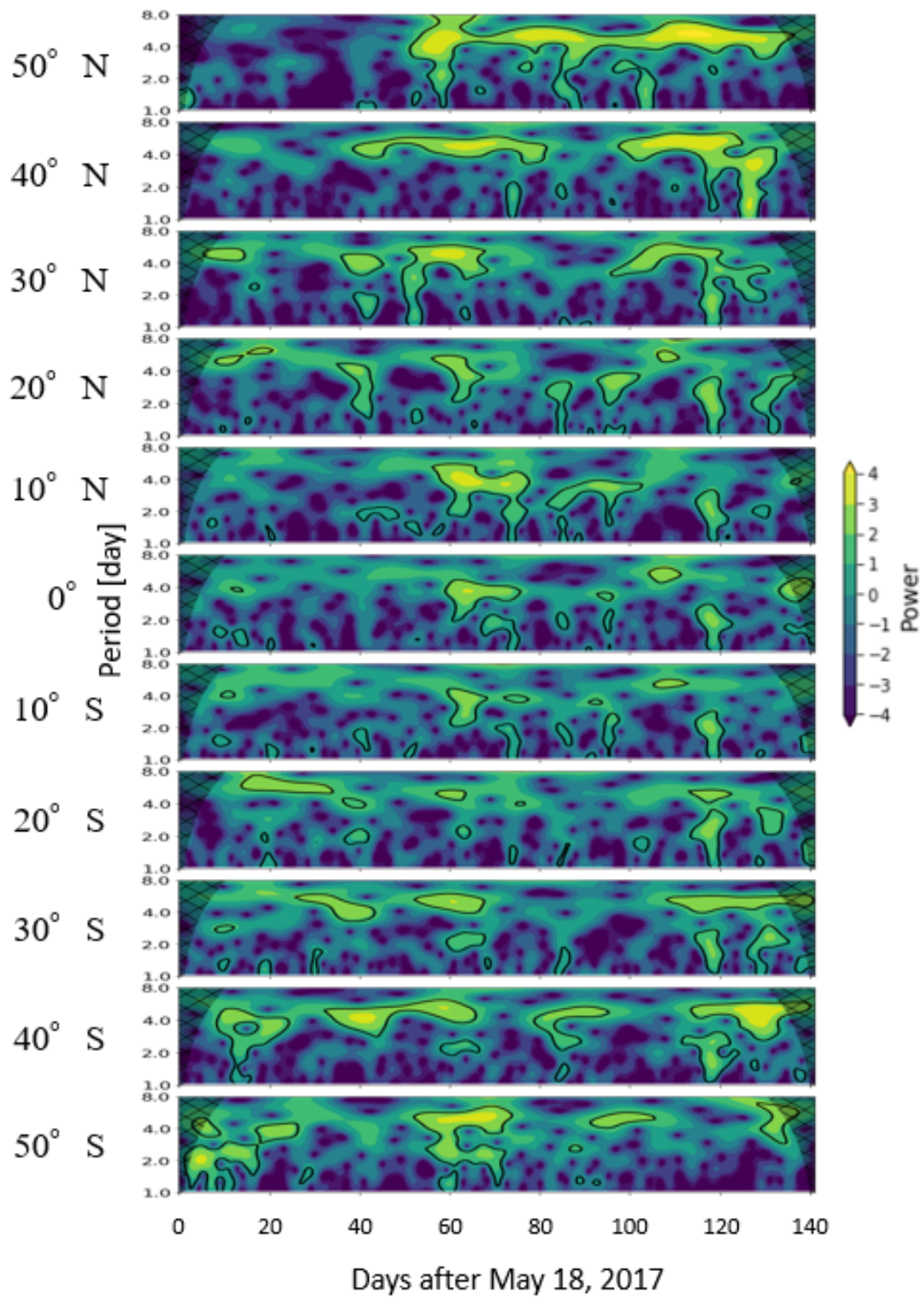


図 5.3： 出射角 40-60°のデータを用いて導出したウェーブレットパワースペクトル

6. 結言

金星の大気循環の理解のためにはどのような惑星規模の波が存在するのかを知ることが重要である。そこで、あかつき搭載 LIR による赤外画像を用いて輝度温度勾配の導出を行い、その時系列を周期解析することによって波の情報を得ることを試みた。期待されている波の温度振幅は 1.0 K のオーダーであるため、0.50 K 程度の観測精度が必要であると考えられるが、LIR による観測データには約 3.0 K の系統誤差と約 0.30 K の相対誤差が存在しているため、系統誤差の影響を受ける解析方法ではこのような波の周期変動を取り出すことは困難である。そこで、波の伝搬にともなって同一画像内の輝度温度に違いが生じることを利用し、同一画像内で東西に離れた 2 箇所の輝度温度差を経度差で割ることによって東西方向の温度勾配を求める。これは相対誤差の影響のみを受けるため波を検出できる可能性がある。

2017 年 5 月 18 日から 142 日間(12±2 時間おきに 283 個)のデータを用いてそれぞれのデータに対して輝度温度勾配を求めた。その際に、出射角が変わると観測高度が変わることを考慮する必要がある。その影響のため、単に任意の 2 点を選んで輝度温度勾配を求めてもそれには大気温度の水平構造、鉛直構造が含まれてしまい解釈が難しい。そこで衛星から見て東側と西側で解析する点の出射角を揃えることにより水平構造のみを取り出した。本研究では出射角 20-40° , 40-60° の範囲のデータを用いて解析を行ない、FFT と wavelet 解析を用いて周期解析を行なった。

FFT の結果によるといくつかの顕著なピークが見られることがわかった。本研究で着目している数日周期の成分に注目すると低緯度では周期約 3.5 日、高緯度では周期約 4.9 日の成分が卓越していることがわかった。周期約 3.5 日の成分は低緯度で振幅の最大値をとり、高緯度に向かって振幅が小さくなる。金星大気の平均東西風の巡回周期はおよそ 4.0 日であるため、この 3.5 日の波は背景風より速く伝搬していることになる。これらの特徴からこの波は Kelvin 波であると推察される。位相に関しては緯度変化が小さいが、南北に若干の傾きも見られる。しかし、本研究ではこれの原因はわからないため今後の課題として残る。周期 4.9 日の成分の振幅は低緯度から高緯度に向かって大きくなる。伝搬速度は背景風よりも遅い。このような特徴からこの波は南北対称の Rossby 波であると考えられる。位相は緯度変化が小さいが、やはりおおむね南北対称の変化を示す。

wavelet 解析では FFT では捉えられない周期変動の時間構造を明らかにした。FFT で顕著にピークが見られていた周期の成分は全ての時間に定常的に存在するわけではなく、卓越する時期としない時期があることがわかった。何が原因で波が局在化するのかはこの研究ではわからないため今後の課題として残る。南北同緯度を比較すると周期約 5.0 日の成分が同時期に卓越している様子が見て取れた。

本研究は金星雲頂での温度変動の時空間構造を明らかにした初めての成果である。波の構造をより正確に推定するためには本研究で明らかにした温度情報だけでなく風速のデータも必要である。そこで、紫外画像を用いた雲追跡による風速計測データと組み合わせることによって、大気循環への寄与が明らかになることが期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教官である今村剛教授にはいつも懇切丁寧にご指導いただきました。大学院進学にあたり専攻を変えたため、右も左もわからずにスタートした研究でしたが、無事にここまで研究を進めることができたのは今村剛教授のおかげです。心より感謝申し上げます。

吉川一朗教授、吉岡和夫講師をはじめとする吉川・吉岡研究室の皆様、今村研究室の皆様から合同ゼミで数多くの鋭いご指摘をいただけたことによって新たな気づきに繋がりました。また、吉川研究室の先輩である疋田伶奈氏、鈴木文晴氏、今村研究室の先輩である奈良佑亮氏、武藤圭史朗氏はいつも気にかけてくださりよく私の質問に答えてくださりました。特に同居室の武藤圭史朗氏、鈴木文晴氏には大変お世話になりました。この場をお借りして深く御礼申し上げます。

同期である成田穂氏、菅原裕太氏にも深く感謝しております。お互いに助け合いながら過ごした2年間はとても良い思い出になりました。

最後に、いつも私のやりたいようにやらせてくれ、今まで支えてくれた家族に感謝したいと思います。本当にありがとうございました。

参考文献

- Burt Pechmann, J., & Ingersoll, A. P. (1984). Thermal Tides in the Atmosphere of Venus: Comparison of Model Results with Observations. *Journal of the Atmospheric Sciences*.
- Del Genio, A. D., & Rossow, W. B. (1989). Planetary-Scale Waves and the Cyclic Nature of Cloud Top Dynamics on Venus. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(3), 293–318.
- Fukuhara, T., Taguchi, M., Imamura, T., Hayashitani, A., Yamada, T., Futaguchi, M., ... Hirata, N. (2017). Absolute calibration of brightness temperature of the Venus disk observed by the Longwave Infrared Camera onboard Akatsuki Akatsuki at Venus: The First Year of Scientific Operation Masato Nakamura, Dmitri Titov, Kevin McGouldrick, Pierre Drossart, Jean-Loup Bertaux and Huixin Liu 7. Planetary science. *Earth, Planets and Space*, 69(1), 1–9.
- Keating, G., Seiff, A., Limaye, S. S., Revercomb, H. E., Taylor, F., Woo, R., & Zahn, U. V. O. N. (1980). VENERA, 85.
- Kouyama, T., Imamura, T., Nakamura, 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 Geophysical Research E: Planets*, 118(1), 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.
- Matsuno, T. (1966). Quasi-Geostrophic Motions in the Equatorial Area. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 44(1), 25–43.
- Nakamura, M., Imamura, T., Ishii, N., Abe, T., Kawakatsu, Y., Hirose, C., ... Kamata, Y. (2016). AKATSUKI returns to Venus. *Earth, Planets and Space*, 68(1).
- Schubert, G., Covey, C., Genio, A. Del, Elson, L. S., Keating, G., Seiff, A., ... von Zahn, U. (1980). Structure and circulation of the Venus atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 85(A13), 8007–8025.
- Smith, A. K., & Perlwitz, J. (2015). Middle Atmosphere: Planetary Waves. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences: Second Edition* (pp. 1–11). Academic Press.
- Taguchi, M., Fukuhara, T., Imamura, T., Nakamura, M., Iwagami, N., Ueno, M., ... Mitsuyama, K. (2007). Longwave Infrared Camera onboard the Venus Climate

- Orbiter. *Advances in Space Research*, 40(6), 861–868.
- Takagi, M., Sugimoto, N., Ando, H., & Matsuda, Y. (2018). Three-Dimensional Structures of Thermal Tides Simulated by a Venus GCM. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123(2), 335–352.
- Taylor, F. W., Beer, R., Chahine, M. T., Diner, D. J., Elson, L. S., Haskins, R. D., ... Bradley, S. P. (1980). Structure and meteorology of the middle atmosphere of Venus Infrared remote sensing from the Pioneer orbiter. *Journal of Geophysical Research*, 85(A13), 7963–8006.
- Torrence Christopher, & P. Compo Gilbert. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*.