

連続観測した星の明るさの変動から
大気変動のシグナルを抽出する試み

提出日 2018年2月15日

岡山大学 理学部 地球科学科

05426529 平井芳治

要旨

地上から観測した星の光は大気減光の影響を受けている。大気減光とは、星の光が地球の大気を通過する際に大気により吸収、屈折、散乱されることを言う。このような大気の影響で星が揺れて見えたり、明るさが変化したりする。大気減光の大きさは大気中の水蒸気量やエアロゾル量によって変化するが、大気の変動によっても変化する。本研究では、天体観測によって得られた星の明るさの変動データから、このような大気変動のシグナルを抽出することを試みた。

観測は2017年9月1日に岡山大学天文台の望遠鏡を使用して行った。観測範囲ははくちよう座の一部を含む視野角0.5度四方とした。長時間(約1時間40分)の観測を2回にわたって実施した。得られた2000枚の画像から、測光、雲の影響を受けたデータの除外、エアマス(光が透過する大気の厚み)の補正、異常値の除去を行い、32個の星の明るさの変動データを得た。これらのデータからスペクトル解析を行った結果、約9分30秒、約15分、1時間以上の3つの周期にシグナルが見られた。大気の変動として、浮力振動が知られている。これは、成層安定なときに、空気の密度差による浮力を復元力として生じる周期10分程度の振動である。周期が9分30秒のシグナルがこれに近いが、統計的検定を行った結果、有意なシグナルとは認められなかった。今回の観測では大気の変動と断定できる有意なシグナルは確認できなかったが、地表付近の大気の影響を受けにくい観測環境なら大気変動のシグナルを検出できる可能性があると考えられる。

目次

1. はじめに
2. 観測・測光
 - 2.1. 観測
 - 2.2. 測光
 - 2.2.1. 測光対象
 - 2.2.2. 測光
 - 2.3. 解析対象
3. データ処理
 - 3.1. 機械等級
 - 3.2. エアマス補正
 - 3.3. 異常値
 - 3.4. 変動データ
4. 解析
 - 4.1. 変動データの標準偏差
 - 4.2. スペクトル分布
 - 4.2.1. スペクトル解析
 - 4.2.2. スペクトル分布図
5. 考察
6. まとめ
7. 謝辞
8. 参考文献

1. はじめに

星がちかちかと瞬いて見えるように、地上から見た星の明るさは一定ではない。これは、星の光が地上の大気を通過するとき吸収、屈折、散乱されるからである。このような大気の影響は、大気中の水蒸気量やエアロゾル量、あるいは部分的な空気の温度差や密度差によって変化する。このような大気による影響の大きさが、風などの大気変動により変化的ことで、星像の揺らぎや、明るさの変動が観測できる。例えば、大気の変動としては浮力振動が知られている。これは、図 1 のように高度が上がるにつれて温位も上がる成層安定な時に、一度空気塊が上昇または下降すると、図 2 のように密度差による浮力と慣性によって空気塊が上下に振動する現象である。振動周期は式(1.1)のように温位と温位勾配によって決まる。

$$N = \left(\frac{g}{\theta} \times \frac{d\theta}{dz} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

ここで、Nは浮力振動の角周波数[1/s]、gは重力加速度[m/s²]、θは温位[K]、zは高度[m]を表している。一般的な大気の温位勾配ではおよそ 10 分周期である。このような大気の変動が星の明るさの変動に表れていると考え、本研究では、天体観測で得られた星の明るさの変動データから大気の変動に関する情報の抽出を試みた。

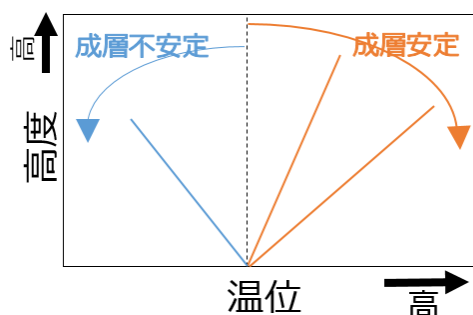


図 1 成層安定、不安定を示す図

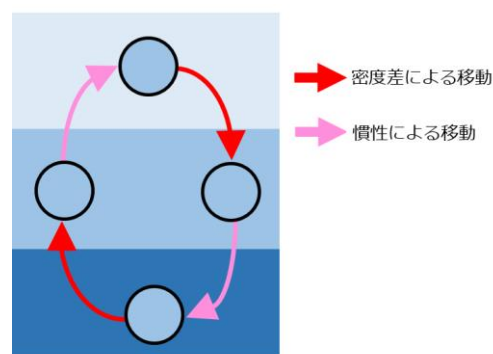


図 2 浮力振動が起こるメカニズム
色が濃い部分ほど密度が高い。空気塊が一度動き出すと、図のように振動し続ける

2. 観測・測光

2.1. 観測

観測は、岡山大学天文台(東経 133° 55′ 21.4, 北緯 34° 41′ 19.1)の望遠鏡を使用し、2017年8月31日夜から9月1日朝にかけて行った。当日は快晴、一時雲が出た。望遠鏡は、MEADE LX600-35F8ACF(口径 356mm、焦点距離 2845mm)、CCD カメラは SBIG STL-1001E を使用した。フィルターは図 3 に示す V バンドのフィルターを使用した。

撮影範囲は、図 4 のように、BSC8143(TYC 3173-3151-1)の周辺で、明るい星が多く入るように決定した。撮影範囲は視野角 0.5 度四方で、この範囲は対流圏界面付近の高度 10km では 100m 四方に相当する。

観測は表 1 のように設定を変えながら 13 回行った。本研究ではできるだけ長い周期を見たいので、観測時間が長い最後 2 回の、1000 枚撮影したデータ(L,M)を使用する。なお、この後は、1000 枚の撮影 1 回目(L)を観測 1 回目、1000 枚の撮影 2 回目(M)を観測 2 回目とする。この 2 回の観測は、露光時間 1.5 秒、撮影間隔 6.2 秒で行っている。撮影間隔が露光時間より長いのは、CCD カメラのデータの読み出しに時間がかかるからである。

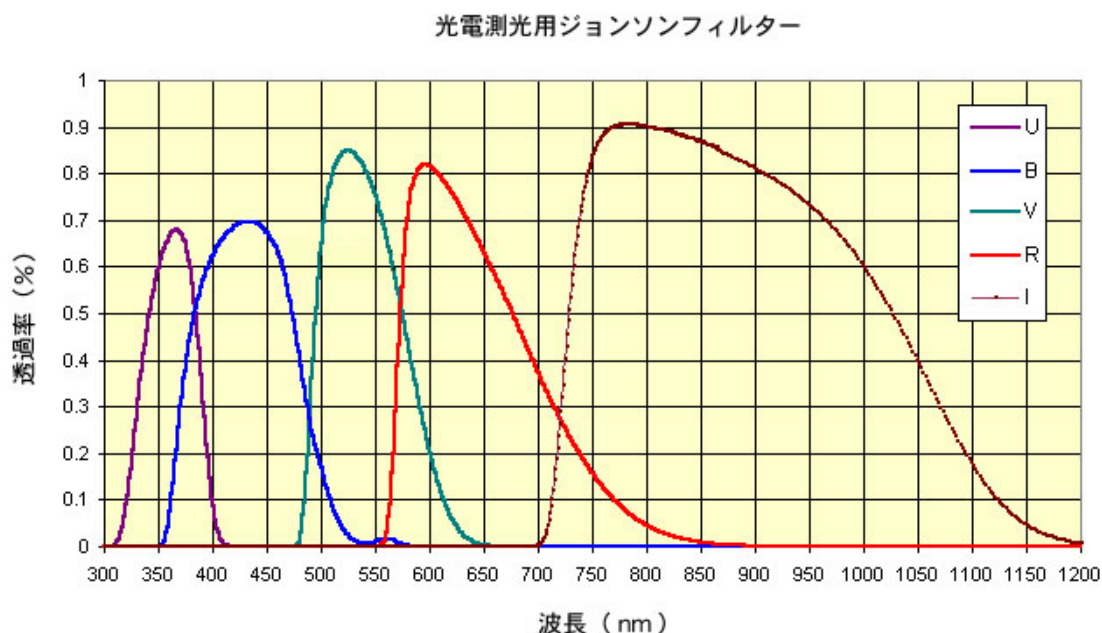


図 3 フィルター透過率 (http://www.sbig-japan.com/UBVRI/ubvri_m.html)

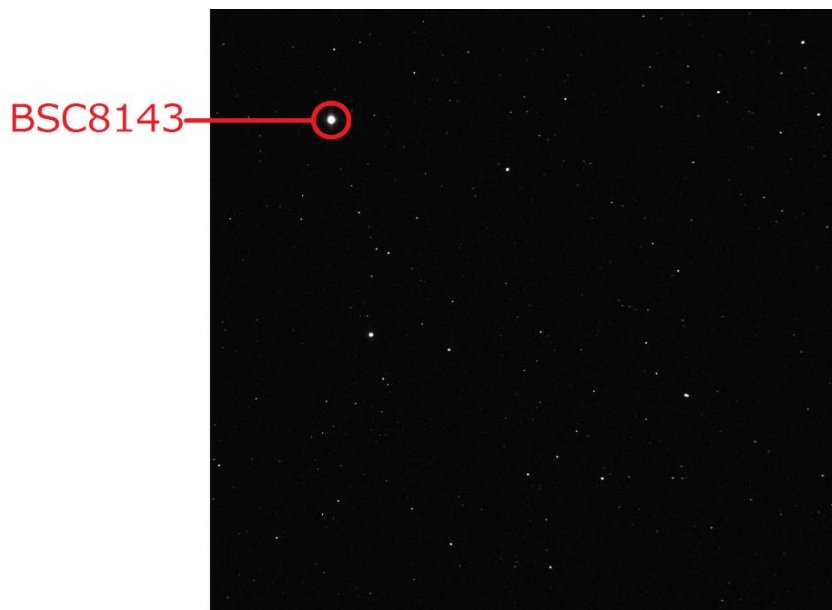


図 4 実際の撮影画像 観測 1 回目の 1 枚目

表 1 観測番号、枚数、撮影時刻、露光時間を表す表

観測番号	撮影枚数	開始時刻	終了時刻	露光時間(秒)
A	100	21:40	21:50	1.5
B	100	22:07	22:17	1.5
C	100	22:24	22:34	1.5
D	100	22:41	22:51	1.5
E	100	22:54	23:04	1.5
F	100	23:09	23:19	1.5
G	100	23:22	23:32	1.5
H	100	23:36	23:46	1.5
I	100	23:49	23:58	1
J	100	0:02	0:11	1
K	100	0:45	0:55	1.5
L	1000	1:00	2:43	1.5
M	1000	2:44	4:26	1.5

2.2. 測光

2.2.1. 測光対象

画像解析ソフト ImageJ (Rasband W.S., 1997-2016)を用いて、撮影した全ての画像に、一時処理としてダーク引きとフラット割を行った。ダーク引きでは CCD カメラの暗電流によるノイズの除去し、フラット割では CCD カメラの感度ムラなどによるノイズの除去をしている。

撮影範囲のうち、ティコ星表 (ESA, 1997)に掲載されている星全てを対象とする。ティコ星表とは、全天で 100 万以上の星を掲載している天体カタログである。なお、ティコ星表に掲載されている星・符号は、SKY-MAP.ORG を参考にした。ただし、時間が経つと撮影範囲から見切れる星 (TYC 3173-314-1) は除外する。また、見かけの距離が近く分離できない星 (TYC 3169-821-1, TYC 3169-821-2) は、1 つの星とみなす。この結果、測光対象は表 2 に示す 34 点になった。

表 2 観測した星のティコ星表の符合と平均カウント値。表の左端のように飽和していない星には星 1 から星 32 まで番号を付けた。

	符号	平均カウント値
	TYC 3173-3151-1	飽和
	TYC 3169-407 -1	飽和
星1	TYC 3169-1065-1	48573
星2	TYC 3169-821 -1,2	40945
星3	TYC 3173-87 -1	19268
星4	TYC 3169-655 -1	18385
星5	TYC 3169-551 -1	16219
星6	TYC 3173-67 -1	11351
星7	TYC 3169-201 -1	8804
星8	TYC 3169-9 -1	8485
星9	TYC 3169-795 -1	8128
星10	TYC 3169-289 -1	7482
星11	TYC 3173-313 -1	6395
星12	TYC 3173-112 -1	5424
星13	TYC 3169-1001-1	5184
星14	TYC 3169-761 -1	4562
星15	TYC 3173-73 -1	4232
星16	TYC 3169-837 -1	3878
星17	TYC 3173-3 -1	3131
星18	TYC 3169-891 -1	3082
星19	TYC 3173-168 -1	2971
星20	TYC 3169-397 -1	2771
星21	TYC 3169-715 -1	2626
星22	TYC 3169-457 -1	2402
星23	TYC 3169-373 -1	2332
星24	TYC 3169-317 -1	2274
星25	TYC 3169-599 -1	2151
星26	TYC 3169-357 -1	1974
星27	TYC 3169-775 -1	1804
星28	TYC 3175-115 -1	1727
星29	TYC 3169-1129-1	1425
星30	TYC 3173-133 -1	1344
星31	TYC 3173-271 -1	1261
星32	TYC 3173-59 -1	1087

2.2.2. 測光

測光は AstroImageJ v.3.2.0(Collins and Kielkopf, 2017) を用いて行った。AstroImageJ の設定は、表 3 のようにした。

表 3 AstroImageJ パラメータの値

	観測1回目	観測2回目
aperture [pixel]	6	9
sky [pixel]	11~17	16~24
CCD gain [e-/count]	2.2	
CCD readout noise [e-]	14.7	

aperture は星の明るさを、sky は背景の明るさを取得する範囲を表している。aperture, sky の範囲は、図 5 のように得られる、各観測最後の撮影の TYC 3169-821-1, TYC 3169-821-2 を対象にした、AstroImageJ の[Analyze] → [Plot seeing profile] で得られた値を参考としている。これは、星周辺の明るさの分布から星や背景の範囲を求めたものである。TYC 3169-821-1, TYC 3169-821-2 を対象にしているのは、2つの星を1つとみなしているため、最も大きな aperture をとる必要があったからである。また、時間経過とともに焦点がずれたため、より大きな aperture が必要な各撮影回最後の画像を選んでいる。観測 2 回目の方が 1 回目より aperture が大きいのは、望遠鏡の調子が悪く時間経過で焦点がずれているからである。

AstroImageJ で得られた、[Source-Sky] の値を星のカウント値として用いる。カウント値とは星の光量のことである。星の明るさを測ると空自体の明るさも含まれてしまうが、[Source-Sky]の値は sky の範囲から空の明るさを測り、星だけのカウント値を示している。また、[Source_Error]の値もこの後で用いる。これはカウント値の誤差範囲である。

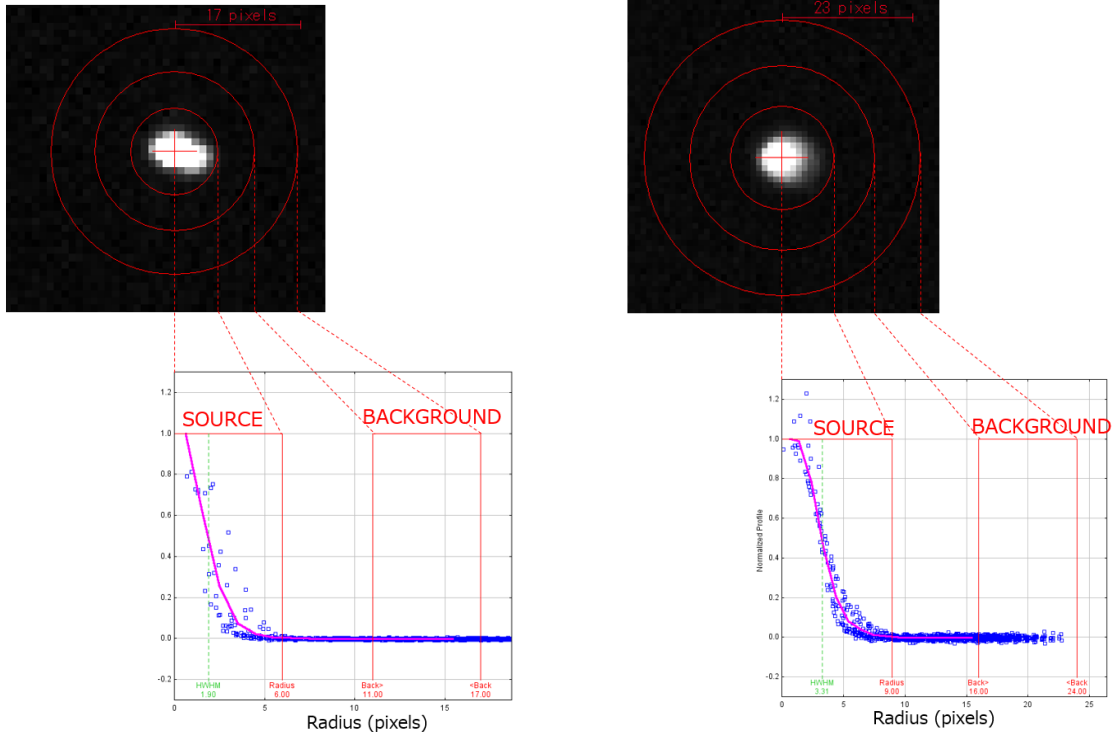


図 5 左)観測 1 回目

右)観測 2 回目

各観測回 1000 枚目の画像で得られた、星周辺のピクセルごとの明るさ分布のグラフ。SOURCE の範囲は星の明るさを取得する範囲。BACKGROUND の範囲は空の明るさを取得する範囲。グラフ上部に撮影写真での範囲を示している。対象の星は TYC 3169-821-1, TYC 3169-821-2 である。

2.3. 解析対象

雲の影響を受けたデータを除外する。観測 1 回目で得られた時系列データには図 6 のように、途中から雲の影響が表れていた。そのため、観測 1 回目については撮影 1~600 枚目のみのデータを使用した。

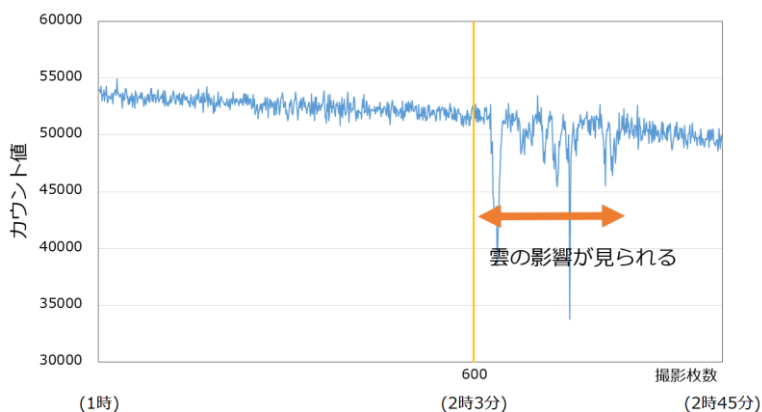


図 6 観測 1 回目 TYC 3169-1065-1 のカウント値の時系列データ

測光対象の星について、ティコ星表の符号・観測 2 回分のカウント値の平均を星ごとに表したのが表 2 である。ただし、雲の影響を受けているデータは除いて平均を計算している。また、表 2 のように、飽和していない星に平均の明るさ順に星 1 から星 32 まで番号をつけた。

露光時間が長かったため、1 ピクセル当たりの星のカウント値が、CCD カメラで蓄積できる値を超えてしまっている明るい星があった(TYC 3173-3151-1, TYC 3169-407-1)。これらの飽和している星は正確に測光できていないので観測対象から除外する。これにより、解析対象は 32 点になった。

観測対象の星に、大気以外による極端な明るさ変動がないことを確認する。各画像で次の式にしたがって、星ごとのカウント値が観測対象の星の合計カウント値に占めている割合を求めた。

$$R_i(t) = \frac{C_i(t)}{\sum_{j=1}^{32} C_j(t)} \quad (2.1)$$

ここで、 i は星の番号 (1~32)、 t は撮影何枚目の画像かを表す。 $R_i(t)$ は各画像での星ごとのカウント値の比率、 $C_i(t)$ は各画像での星ごとのカウント値を表している。これを時系列順にしたものが図 7 である。どの星も明るさの比率はほぼ一定なので、大気以外の原因による極端な明るさ変動をもつ星は観測対象に含まれていないことが確認できる。

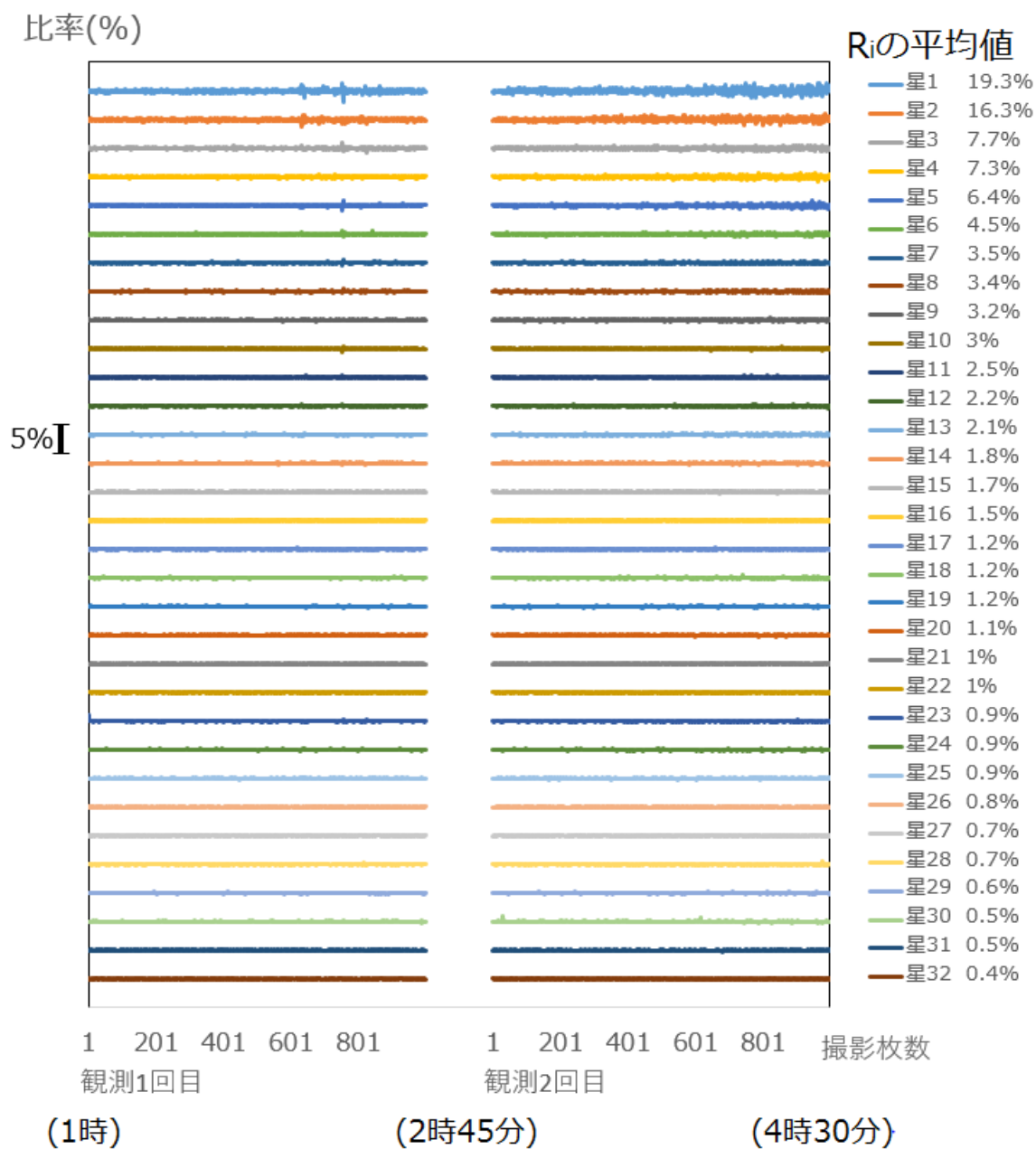


図 7 観測 1 回目・2 回目で取得した画像で、ある星のカウント値が観測対象の星の合計カウント値に占めている割合。見やすさのため折れ線グラフを 5% ずつずらして書いている。そのため、縦軸は比率の変動幅のみを表す。折れ線グラフの横の値はそれぞれの星の R_i の平均値である。

3. データ処理

3.1. 機械等級

星の明るさをカウント値から式(3.1)に従って変換する。

$$m = -2.5 \times \log_{10} C \quad (3.1)$$

ここで、 m を機械等級とする。 C はカウント値である。
以降は機械等級を使って解析を行う。

3.2. エアマス補正

星の光が通過する大気の厚みのことをエアマスという。観測している星の高度が変化すると、エアマスも変化する。光は大気によって吸収、屈折、散乱されるので、エアマスが変化すると、大気減光の大きさが変化し、星の明るさも変化する。図 8 のように、天頂近くに見える星はエアマスが小さく、大気減光も小さい。高度が低い星はエアマスが大きく、大気減光も大きい。この影響を取り除くため、エアマスの補正を行う。

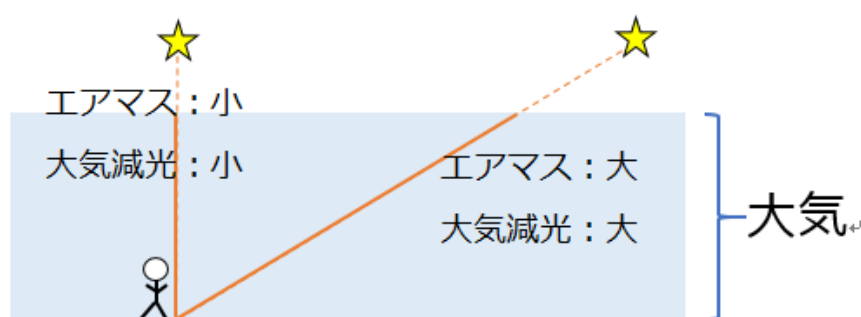


図 8 星の高度によるエアマスの違いを表した図

大気減光の大きさはエアマスに比例するとして、式(3.2)を用いて星ごとに補正をした。

$$m_0 = m - az \quad (3.2)$$

ここで、 m_0 は大気減光を受けていない機械等級、 m は観測から求めた機械等級である。 a は大気減光係数で、 z はエアマスである。 z の値は、 $\frac{1}{\cos\theta}$ (θ は天頂角) で求めた。また、 a の値は次のように求める。

重みつき最小自乗法を用い、観測 1 回目・2 回目を合わせて回帰直線を求める。回帰直線は、縦軸機械等級、横軸エアマスのグラフ上での線形回帰直線を用いた。式(3.3)が最小になるような一次関数 $f(z) = a_1z + b$ を星ごとに求めた。

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \left(\frac{1}{e_i} \right)^2 \times (m_i - f(z))^2 \right\} \quad (3.3)$$

ここで、 z はエアマスの値。 m_i は観測から得られた星の機械等級。 e_i は、測光で生じた誤差[Source_Error] を機械等級に直した値。 i は撮影何枚目の画像かを表す。観測1回目の600枚、2回目の1000枚を合わせて $n=1600$ で行った。式(3.3)で得られた $f(z)$ を回帰直線とした。ここで求めた $f(z)$ の z の一次の係数 a_1 を大気減光係数 a とする。図9ではエアマスの補正前後の機械等級の分布を示している。補正後では、エアマスの大きさによらず機械等級がほぼ一定の値をとっていることが確認できる。

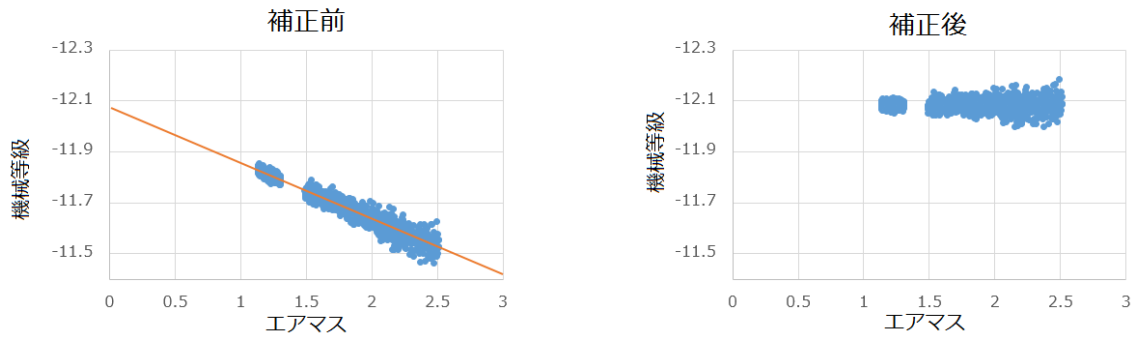


図9 星1を対象にしたエアマスの補正前後を表す図。補正前のオレンジの線は式(3.3)で求めた回帰直線 $f(z)$ である。

3.3. 異常値

図 10 の赤点のように、観測データ中に瞬間的に明るくなっているデータが含まれている。このようなデータを異常値とする。式(3.4)から回帰直線と観測値のズレの標準偏差 σ を求めた。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - b)^2} \quad (3.4)$$

ここで、 σ は標準偏差、 n はデータ数、 m_i はエアマスの処理を行った機械等級、 b は式(3.3)で求めた回帰直線の y 切片である。なお、式(3.4)中で、エアマスの処理を行った m_i の回帰直線は $y = b$ に等しい。

回帰直線の値と比べて 5σ 以上明るくなっているデータを異常値とした。異常値は観測1回目には1点、2回目には6点あった。このうち6点については、何らかの光が星に重なっていることが確認できた。異常値が含まれてる星は、異常値を除いて式(3.2)からエアマスの処理をやり直した。

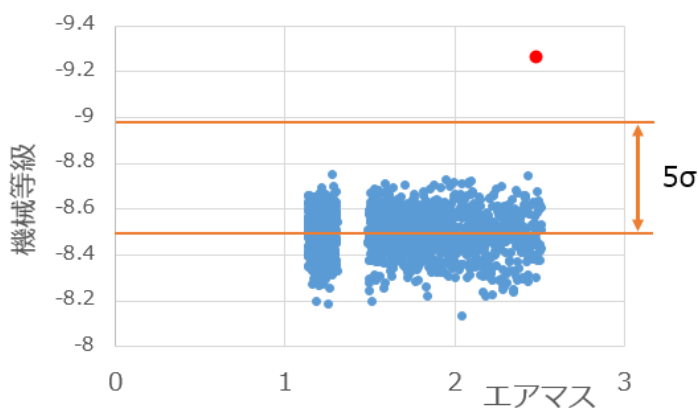


図 10 星 28 の観測データの分布を縦軸機械等級、横軸エアマスで表した図。下のオレンジの線は星 28 の回帰直線。上のオレンジの線は回帰直線より 5σ 明るいことを示す線。グラフ右側の赤点が異常値とみなした点。

3.4. 変動データ

ここまでの処理を行った機械等級の変動データには、観測 1 回目と 2 回目の両方が含まれている。ここで、観測 1 回目と 2 回目を分けそれぞれで、機械等級の平均の値を、エアマスを補正した機械等級の値から引く。ただし、機械等級の平均を求める際には異常値は含まない。また、異常値としたデータは変動 0 の値に置き換える。これにより平均が 0 の等級の変動データを観測 2 回×星 32 点分得た。

4. 解析

4.1. 変動データの標準偏差

全ての変動データについて、変動の標準偏差を求めた。これを星ごとに観測1回目、2回目を並べて示したのが図 11 である。左から星の番号順に並べている。また、星の明るさとして式(3.3)で求めた回帰直線 $f(x)$ の y 切片の値 b を示している。これはエアマスが0のときの機械等級に相当する。このグラフを見ると、明るい星ほど明るさの変動幅が小さいことがわかる。また、観測2回目の方が観測1回目より変動幅が大きくなっていることがわかる。

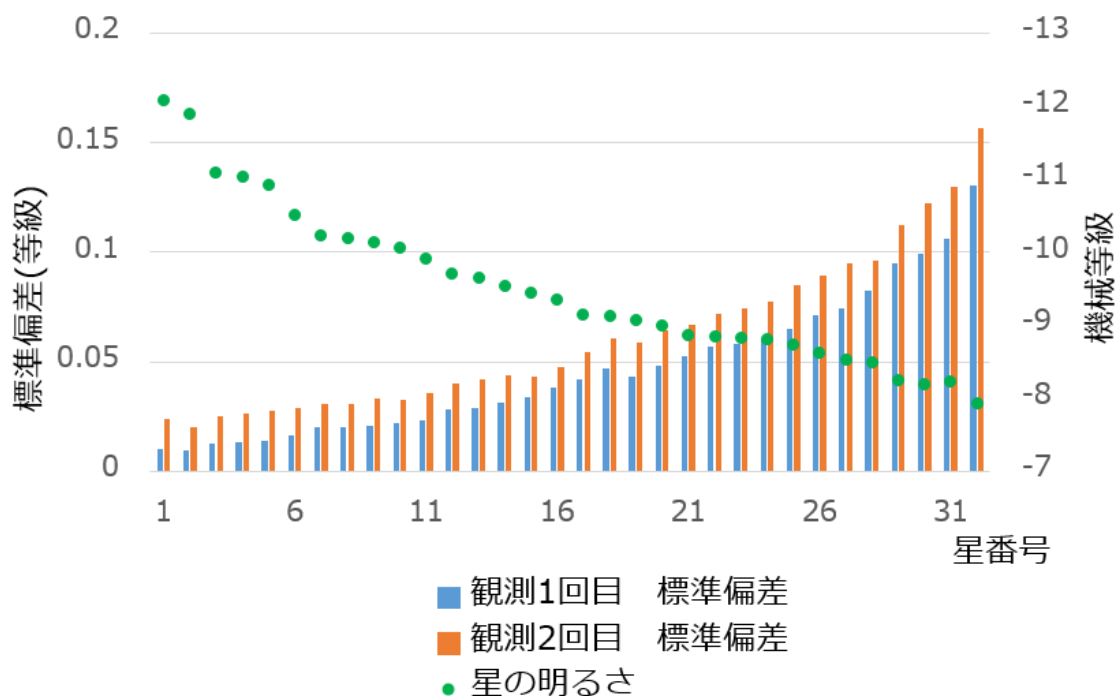


図 11 星の明るさと明るさ変動の標準偏差を表している。一部明るさが星の番号順になっていないのは、異常値が多く含まれていて星に番号付けをする時に明るく見積もられていた星があったからである。

4.2. スペクトル分布

4.2.1. スペクトル解析

変動データにFFTを行うことで、スペクトル解析を行う。FFTにはISPACK(石岡、2015)を用いた。ISPACKは、 $(2^a \times 3^b \times 5^c)$ のデータ数にも対応しているため、観測1回目の600点、観測2回目の1000点の変動データを全て活用することができる。フーリエ変換は式(4.1)で行った。

$$a(\omega_k) = \frac{T}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x(t_j) \times e^{-2\pi i \frac{jk}{N}} \quad (4.1)$$

ここで、 $a(\omega_k)$ はフーリエ係数で、 $\omega_k = \frac{2\pi k}{T}$ ($0 \leq k \leq \frac{N}{2}$)、である。 $x(t_j)$ は変動の時系列データで、 $t_j = j \times \Delta t$ ($0 \leq j \leq N-1$)である。 T は観測時間で、観測1回目では $T=3695$ (秒)、観測2回目では $T=6172$ (秒)である。 N はデータ数で、観測1回目では600、観測2回目では1000である。 Δt は、 $\Delta t = \frac{T}{N-1}$ で求めた。 i は虚数単位である。また、式(4.2)に従ってパワースペクトル密度を求めた。

$$P(\omega_k) = \frac{|a(\omega_k)|^2}{T} \quad (4.2)$$

ここで、 $P(\omega_k)$ はパワースペクトル密度[等級²/s]である。観測2回×32点について同様の解析を行い、それぞれのスペクトル分布図を作成した。

4.2.2 スペクトル分布図

図 12 は、作成したスペクトル分布図を観測回ごとにまとめたものである。星番号順に複数の星を取り、それぞれの周波数でパワースペクトル密度の平均を計算した。取る星の数は、8 個、16 個、24 個、32 個で行った。図中に赤矢印で示した部分、①と②の周期のシグナルは観測 2 回目の上 2 つのスペクトル分布図に表れている。①は周期約 9 分 30 秒、②は周期約 15 分のシグナルだった。③のような長周期のシグナルは観測 1 回目 2 回目どちらでも見られるが、観測 2 回目のほうがはっきりと表れている。また、それぞれのシグナルは星の数を増やすにつれピークが小さくなっている傾向が見られる。そこで、星 1 から星 16 のデータを使用し、シグナルの有意性を検証した。観測 1 回目、2 回目で周波数ごとに平均的なスペクトルを取り、95%信頼区間を求めた。それが図 13 である。95%信頼区間を見ると、①②は有意なシグナルとは言えなかった。取る星の数を変えてもこれらのシグナルは有意なシグナルとは言えなかった。③のシグナルは 95%信頼区間から考えると有意である。

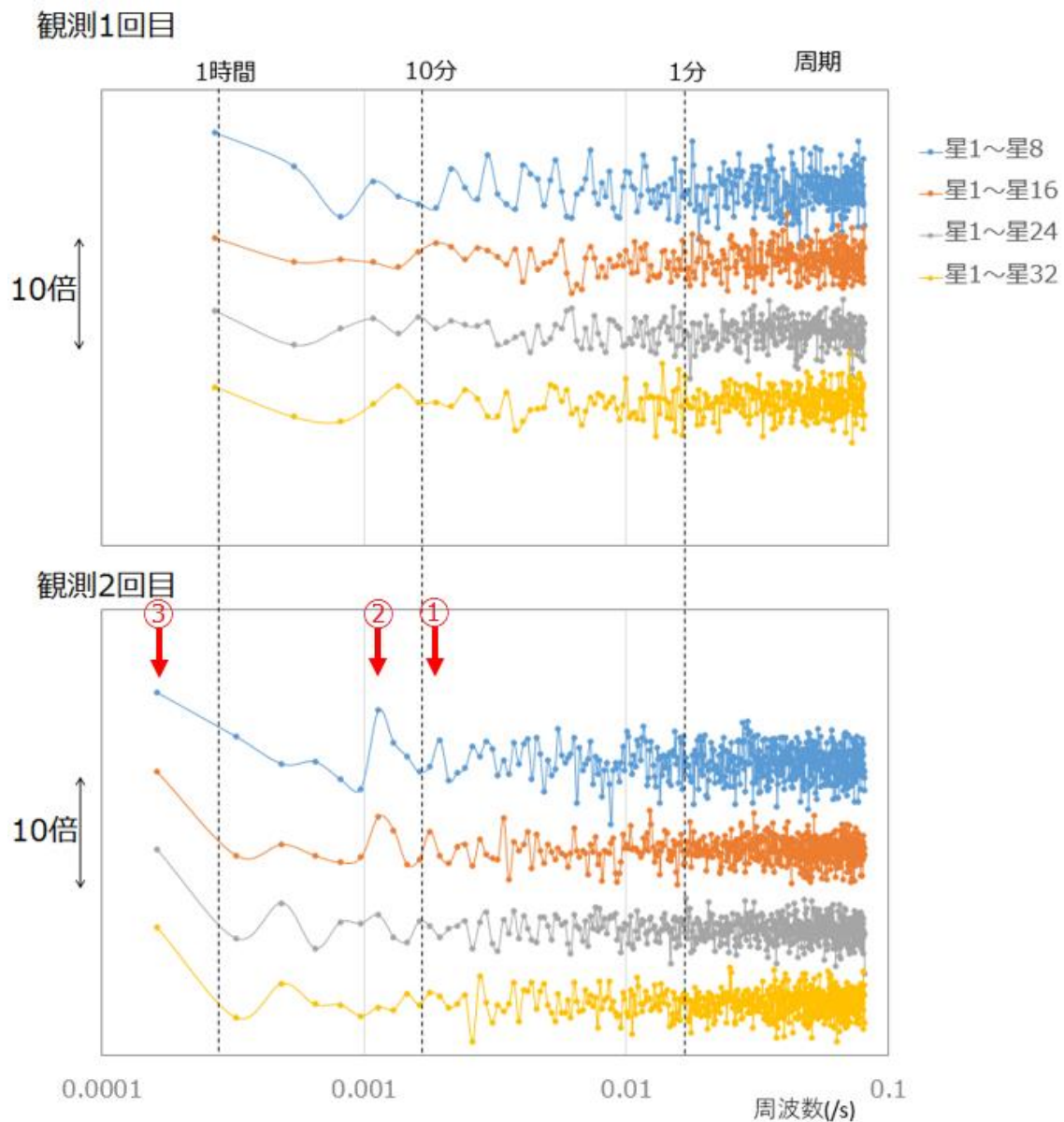
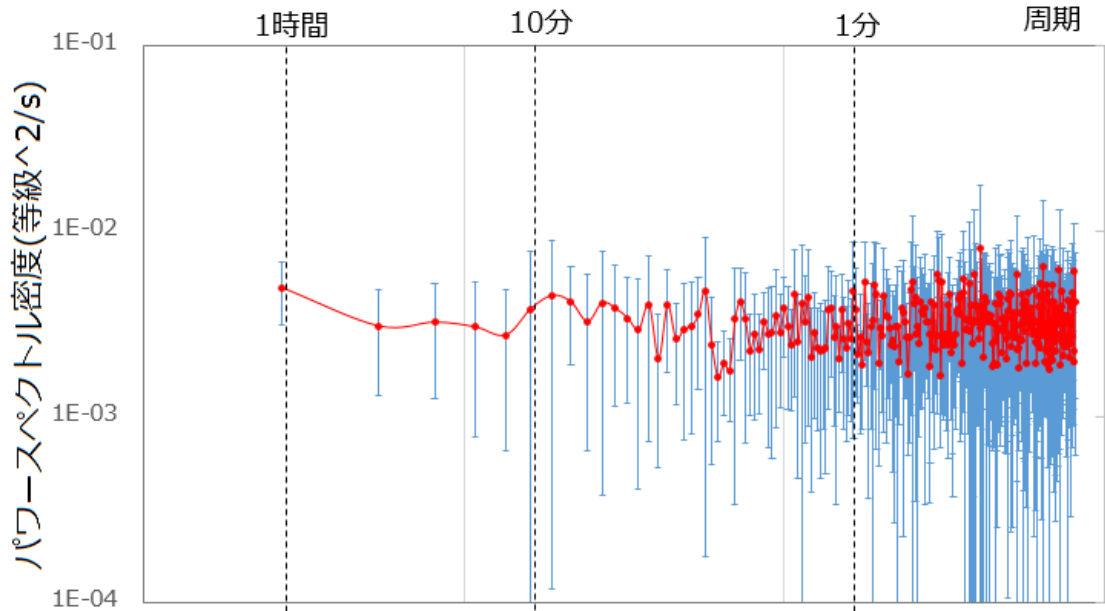


図 12 平均的なスペクトルの分布。縦軸はパワースペクトル密度(等級²/s)、横軸は周波数(/s)と周期を示している。縦軸と横軸どちらも対数をとっている。上のグラフが観測 1 回目、下のグラフが観測 2 回目のデータを使用している。グラフ内の 4 つの線は上から、星 1 から星 8 まで、星 16 まで、星 24 まで、星 32 まで、で平均的なスペクトルを取っている。それぞれのスペクトルが重ならないようパワースペクトル密度の値を 10 倍ずつずらしている、縦軸はそれぞれのスペクトルの変動のみを表している。

観測1回目



観測2回目

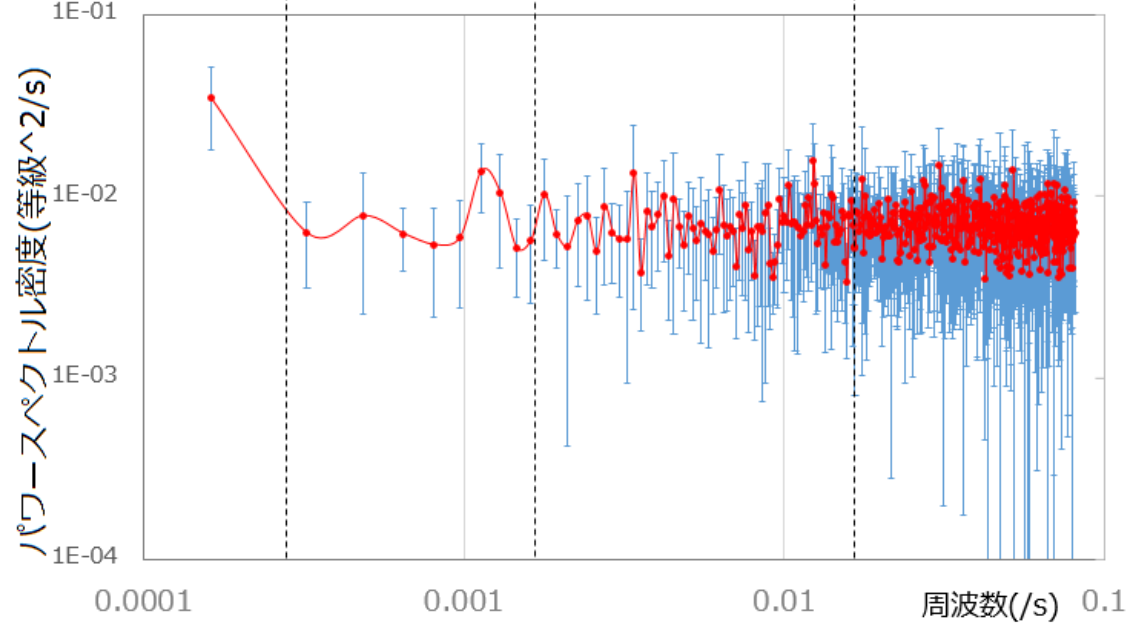


図 13 星 1 から星 16 までの平均的なスペクトルの分布と誤差範囲。縦軸はパワースペクトル密度(等級²/s)、横軸は周波数(/s)と周期を示す。赤い線は 16 点のパワースペクトル密度の平均を示し、青い誤差範囲は 95%信頼区間を示している。

5. 考察

図 14 は、気象庁のデータを元に作成した 2017 年 8 月 31 日 21 時の松江市の温位の垂直プロファイルである。観測当日は成層安定だったことがわかり、浮力振動は起きてても良い状態だったことがわかる。図 12 の赤矢印①では浮力振動に近い周期でシグナルが見られたが、有意ではなかった。図 12 の赤矢印②で示したシグナルは周期が約 15 分で、浮力振動の周期としては長すぎた。また、図 12 の③で示されたシグナルはエアマスの補正が不完全だったことが考えられ、統計的には有意なシグナルだったが、この周期の振動が実際にあったのかは疑わしい。有意性を検証するために図 13 では星 1 から星 16 までの変動データを用いたが、これは任意性がある。しかし、データ数を減らすと 95%信頼区間の幅が大きくなる。また、データ数を増やすと暗い星まで含まれ、シグナルが埋もれてしまう。これは暗い星ほど明るさ変動の標準偏差が大きいことに表れているように、暗い星ほど測光で生じる誤差が大きいからである。用いる星の数を 2 個から 32 個まで変化させて、平均的なスペクトル分布と 95%信頼区間を求めたが、本研究で用いたデータからは長周期以外で有意といえるシグナルは検出されなかった。

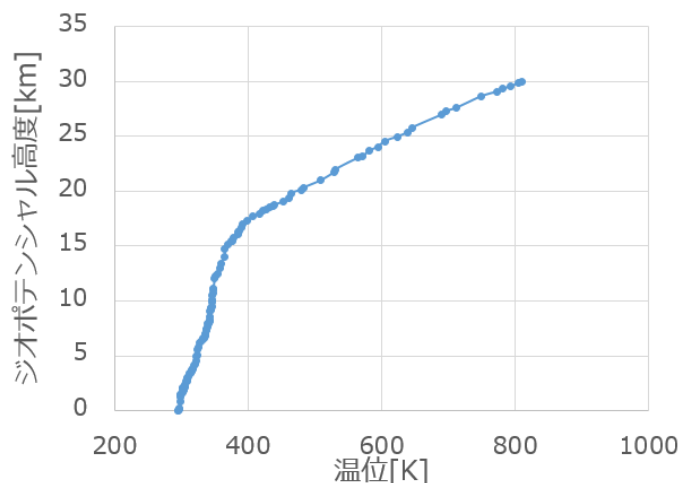


図 14 8 月 31 日 21 時松江市での温位の垂直プロファイル
データは気象庁 HP から取得した

浮力振動のみに注目して、シグナルが表れなかった原因を考える。大気揺らぎは大きく 2 種類に分けられる。①上空数百 m 以上の大気による大気揺らぎ、②地表付近の大気による大気揺らぎである。まず、①の上空数百 m 以上の大気について考える。合田周平(2014)、合田周平(2016)によると、観測によって得られた、高度ごとの大気揺らぎの比率は表 4 のようになっている。この結果から高度 2km 付近の風速が速いほど大気揺らぎは激しく起こり、浮

力振動によるシグナルは埋もれてしまうと考えられる。図 15 に示したのは、8 月 31 日の松江市の風速の鉛直プロファイルである。岡山市と松江市とで離れてはいるものの、高度 2km 付近では、観測時に夏場の中で特に風速が速かったわけではないと思われる。次に、②地表付近の大气による大气揺らぎの影響を考える。表 4 では、地表付近での大气揺らぎが全体の半分程度を占めていることもわかる。地表付近の大气揺らぎは、地形による風や、周囲の構造物などからの熱、観測をしている人の体温、望遠鏡のドーム内外の温度差などによる空気の乱れによって生じる。大きな観測設備では望遠鏡を建物から離れた場所に設置したり、別室で望遠鏡を操作したりすることが多いのはこのためである。今回の観測では地表付近の大气揺らぎが与える影響をあまり考慮しないまま観測をしていたため、観測データが地表付近の大气揺らぎの影響を大きく受けていたことは十分に考えられる。その条件の中で有意ではないとはいえシグナルが見られたことを考えると、地表付近の大气揺らぎの対策が十分に行われている環境であれば、観測による星の明るさ変動から大气の変動データを抽出することは可能かもしれない。

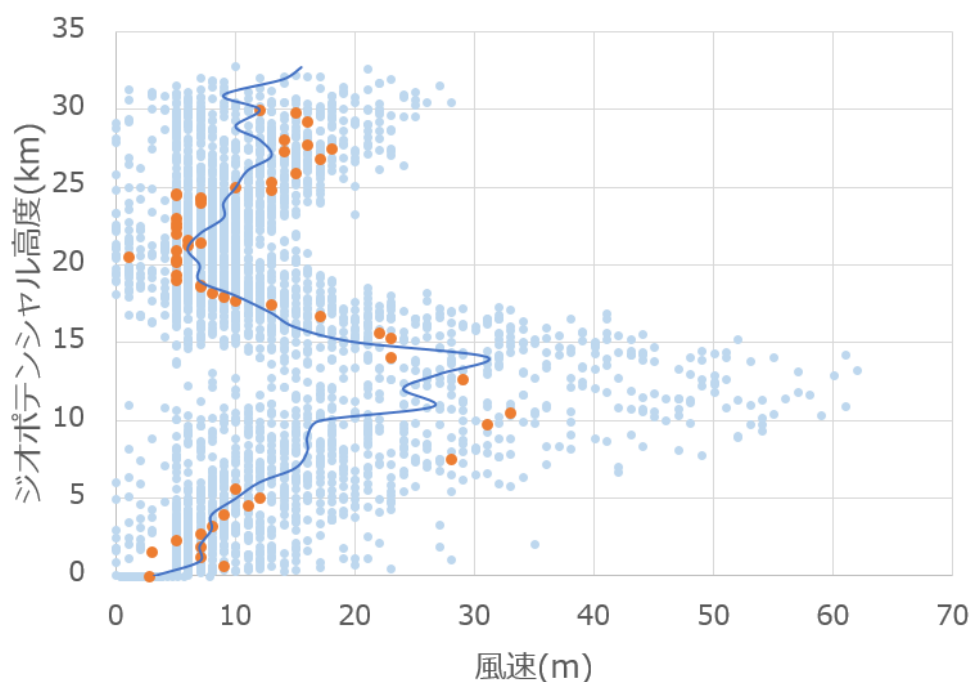


図 15 松江市の風速の鉛直プロファイル。オレンジの点が 8 月 31 日 21 時の風速を示す。水色の点は 2017 年 8 月 9 月の 2 ヶ月間の 21 時のデータ。青色の線は 8 月 9 月のデータから 1km ごとに求めた風速の中央値を示す。データは気象庁 HP から取得した。

表 4 高度ごとの大気揺らぎの比率
合田周平 (2016) より

高度	C_n^2 の割合
16km	8.4 %
8km	1.6 %
4km	5.3 %
2km	14.9 %
1km	2.5 %
0.5km	16.8 %
地表層	50.6 %

6. まとめ

大気の影響による星の明るさの変動を観測し、スペクトル解析することで大気変動のシグナルを抽出しようと試みた。望遠鏡は岡山大学天文台の 356mm 望遠鏡 (MEADE LX600-35F8ACF) を使用した。観測は 2017 年 8 月 31 日夜から 9 月 1 日の明け方まで行った。そのうち午前 1 時から午前 2 時までに撮影した 600 枚、午前 2 時 45 分から午前 4 時 30 分までに撮影した 1000 枚の撮影画像をデータ解析に用いた。撮影画像の中からティコ星表に掲載されている 32 点の星を解析対象とした。データ処理の流れは、撮影画像の一時処理 (ダーク引き・フラット割)、測光、機械等級への変換、エアマスの補正、異常値の判別、でこれらの処理を行ったデータを星の明るさの変動データとして得た。この結果、暗い星ほど等級の変動の標準偏差は大きいことがわかった。これは暗い星ほど測光誤差が大きいからだと考えられる。また、変動データをスペクトル解析すると、10 分近くの周期、15 分程の周期、長周期にシグナルが見られた。10 分近くの周期は大気の浮力振動に近い周期だった。しかし、10 分近くの周期と 15 分程の周期のシグナルは有意とは言えなかった。また、長周期のシグナルについてはエアマスの処理が不完全だったことなどが考えられ、実際に振動があったかは疑わしい。今回の観測からは大気振動のシグナルは抽出できなかったが、地表での大気揺らぎを受けにくいような観測環境なら大気変動のシグナルを検出できるかもしれない。

7. 謝辞

本研究を行うにあたり、お忙しい中多くの時間を割いていただき、丁寧に指導していただいた野沢徹教授に心より感謝いたします。

はしもとじょーじ准教授には、望遠鏡や解析方法についての様々な助言をいただきました。

また、同研究室の林克樹氏、渡邊朋紀氏、岡村和樹氏、角谷謙斗氏の各院生の方々、森健太氏、山田将輝氏の四回生の各氏からは、日ごろから様々な助言や協力をしていただきました。皆様ありがとうございました。

8. 参考文献

- ISPACK (石岡, 2015) (<https://www.gfd-dennou.org/library/ispack/>)
- ImageJ (Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <https://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2016.)
- AstroImageJ - v. 3.2.0 (Collins and Kielkopf, 2017)
- ティコ星表 (ESA, 1997, The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200)
- 気象庁 (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)
- SKY-MAP (<http://www.sky-map.org/>)
- 合田周平 (2014) 「MASS-DIMM による名寄の大気擾乱高度プロファイルの測定」
- 合田周平 (2016) 「惑星観測用大気揺らぎ補償光学系のための惑星表面模様の相関追跡による波面測定方法の研究」