

セファイド型変光星の周期と等級から 距離を求める

3年 W.H O.Y T.Y S.T M.M H.T

1. 概要

夜空を見上げると無数の星がある。それらの星はどれも同じように輝いている。しかし、実際には地球からの距離はまったく異なり、果てしなく遠いものや、近いものもある。そこで今回の研究では、星までの距離を測定することにした。では、天体の距離の測定方法をいくつか挙げてみる。

太陽系内など、地球から近い星の距離はレーザーの反射を用いて距離を測定する。天体によっては距離が遠く、レーザーが届かないこともある。また反射して地球に戻ってくるのに時間がかかる場合は、年周視差法（三角視差法）を用いる。この方法は太陽系に比較的近い恒星の距離測定に用いる。

系外銀河のように、かなり離れた距離を測定することもある。その場合、系外銀河内に存在するセファイド型変光星を用いることで距離を測定する。

今回の研究では の方法を用いて、ペガスス座にあるセファイド型変光星の DH Peg を観測した。ではまずセファイド変光星について述べる。

2. 目的

本研究の目的は、セファイド型変光星の周期を観測で求め、見かけの等級と真の等級を比べることで、天体までの距離を求めることである。

3. 先行研究

3.1. セファイド変光星について

セファイド変光星とは、HR 図上でセファイド不安定帯に属する脈動変光星をさす。重力とガス圧のバランスが崩れて星が脈打つように膨らんだり縮んだりすることで、光度が変化している。

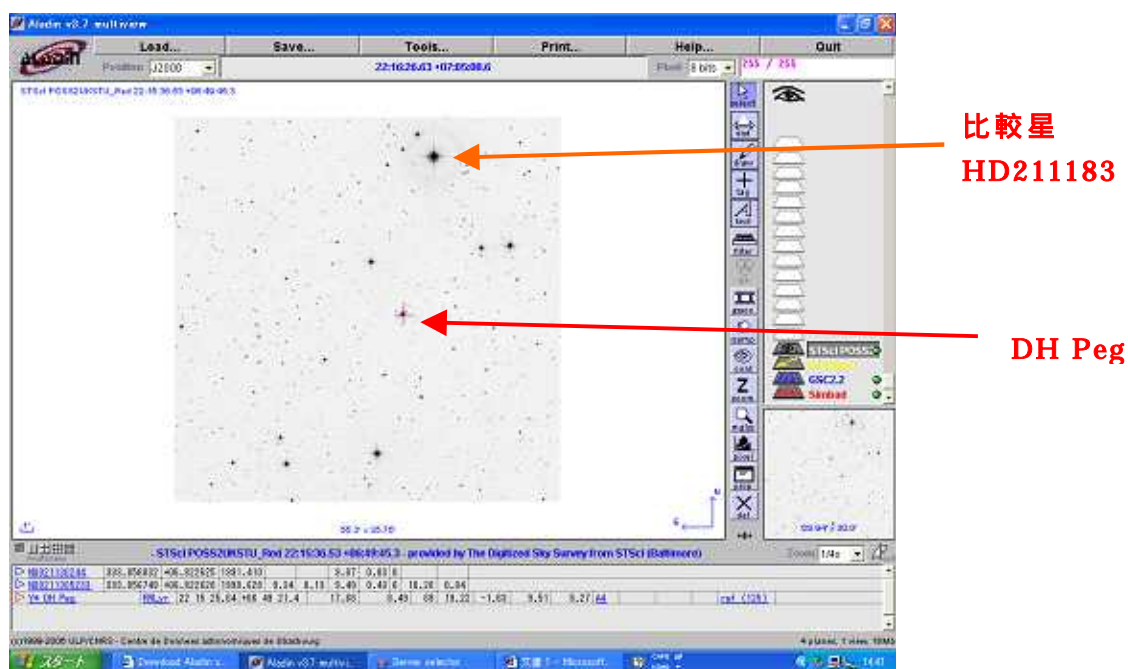
セファイドはふつうの星と同じく、主に水素とヘリウムから成るガスでできている。中心部で発生した光は、このガス層を通り抜けて宇宙に放出される。その際、一部の光子が水素やヘリウムの電子をはじき出してイオン化させる（あるいは、1 価のヘリウムイオンを 2 価に変化させる）。この状態変化によってガスの透明度が低下し、通り抜けられなくなった光子が吸収されてガスを加熱する。こうして高温になったガスは圧力が高くなり、膨張して明るく輝き始める。しかし、ある程度膨張を続けるうちに星の温度が低下し始める。すると離れていたイオンが再び電子と合体し、星の内部からの光はガスを通り抜けられる。この後急速にガスは冷却され、重力がガス圧に打ち勝って収縮し始めるのだ。通常のセファイドは、数日から数ヶ月の周期で、以上のようなサイクルを繰り返す。

星全体が膨らんだり縮んだりすることから、セファイドの変光周期は、天体の大きさと密接な関係（周期光度関係）がある。基本的には天体が大きいほど明るい。しかしセファイド変光星には種族があり、種族 I とよばれる若い世代の星と種族 II とよばれる年老いた世代の星では、周期光度関係が異なるとされている。ちなみに、観測対象である DH Peg は種族 I である。またセファイド変光星にはケフェウス座 W 型、おとめ座 W 型、そして今回の観測対象であること座 RR 型など、様々な種類がある。

3.2. DH Peg を探す

では、実際の観測に必要な DH Peg の座標を探す。また同時に比較星を決定する。インターネット上にある星表データ Aladin を用いることにした。

The Aladin Sky Atlas (<http://aladin.u-strasbg.fr/aladin.gml>)



DH Peg (等級 9.41 赤経 22h15m25.64s 赤緯 +06° 49' 21.4) 比較星 D211183 (等級 7.11) は変光星ではないことを確認した。

3.3. 冷却 CCD カメラとは

今回は観測機材として冷却 CCD カメラを用いた。CCD とは、Charge Coupled Device の略で、「電荷結合素子」などと訳される。写真と同じように画像を記憶するが、写真フィルムが光によってハロゲン化銀が還元され像が作られるのに対して、CCD カメラは、半導体チップの表面（受光面）で捕らえた光を電気信号（電荷）に変える電子部品で、電荷を蓄積することができるようになっている。今回の観測のようにある程度の長さの露光を行う場合は、CCD チップは熱によって発生する暗電流（ダークノイズ）にも反応してしまい、このままではノイズ（画像に小さな白い斑点が現れる）が多い画像になってしまう。そこで冷却 CCD カメラは、この問題を防ぐため CCD チップを冷却し暗電流（ダークノイズ）の発生を押さえている。CCD チップの温度を下げるこ

によってこのノイズを少なくすることができる。

3.4. バンドパスフィルターとは

今回の観測ではRバンドフィルターを用いる。バンドパスフィルターとは、ある波長または波長帯の光を透過させ、その短波長側、および長波長側の光を反射させるフィルターである。入射角度を変化させることにより、透過波長を調整する。R・G・Vの他にも様々な種類があり、今回Rバンドパスフィルターを用いた理由は、赤い波長は対象とする恒星の高度変化にともなう大気の影響（長時間観測によるもの）に左右されにくいためだ。

4. 観測

今回の観測には冷却 CCD カメラを用いることにした。露光時間は事前には決めず、実際の測定結果をもとに調整を行った。またバンドはRバンドを用いることにした。

4.1. 観測手順

4.1.1. CCD の冷却

CCD チップを冷却することが大切であることは、前に述べた通りだ。しかし冷却するにあたって大切なことがある。それは急激に冷却しないことだ。急激に冷却することで、チップが結露してしまい傷つくからだ。もちろん観測後も一気に常温に戻すのは危険だ。そのため冷却する時間も考えて、タイムスケジュールを立てるようにする。

4.1.2. 露光時間の決定

まず露光時間を決める。CCD はフィルムに比べ、30~100 倍の感度を持っていると言われている。そのため数秒の露光だけでも暗い星雲などは写る。しかし正確なデータが必要であればある程度の露光時間が必要になるのだ。CCD チップの性能がそれぞれ異なるため、観測時に決めるのが望ましい。ただ、露光オーバーにならないように気をつける。ちなみに今回は露光時間 60 秒で 2 分毎に撮影した。

4.1.3. ダークフレーム撮影

いくら CCD チップを冷却するといっても、市販のものでは絶対零度までは冷却できないので、ダークノイズが必ず画像に表れる。そのため、ダークノイズだけを撮像した画像を別に撮って、元画像からそれを引くことで（減算）ダークノイズのないきれいな画像にする。ダークフレームの撮り方は CCD に光が当たらないよう、キャップをして行う。冷却温度と露光時間は天体を撮像するときと同じになるよう設定して撮像する。CCD は感度が高いので遮光には十分に注意する。

ただし今回は天体撮影と同時に、撮影画像からダークフレームを除く処理を自動で行った。

4.1.4. フラットフレーム撮影

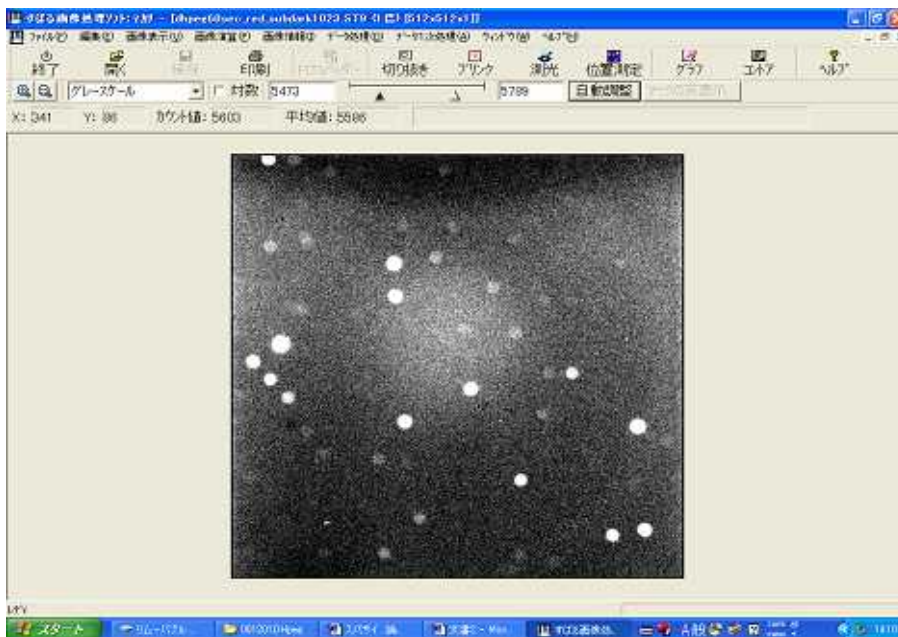
CCD チップ上にあるゴミなどで、画像によけいな像が写ることがある。そこでフラットフィールドと呼ばれる画像を撮って、画像処理でホコリをきれいに取り除く必要がある。撮影する時は、夜空の自然光を用いる方法と、壁などに照明を当てる人工光を用いる方法がある。壁を使う場合は、白っぽい無地の壁面を使って、照明を当てて撮る。また光害のある場所では、実際の夜空を使って撮ったほうがよく、できるかぎり天頂近くを撮像する。とにかく重要なことは均一な光で撮影することだ。ただし今回は共通のフラットフレームを用いたため、この撮影は行っていない。

4.1.5. 天体の撮影

ここまでの準備ができれば、ステラナビゲータを用いて DH Peg の座標（赤経 22h15m25.64s 赤緯 +06°49' 21.4"）を設定し、露光時間にしたがって撮影をする。そして撮影した画像を用いて画像解析を行っていく。

4.2. 撮影画像

以下のような画像を 17:30 から 21:30 まで撮影することができた。

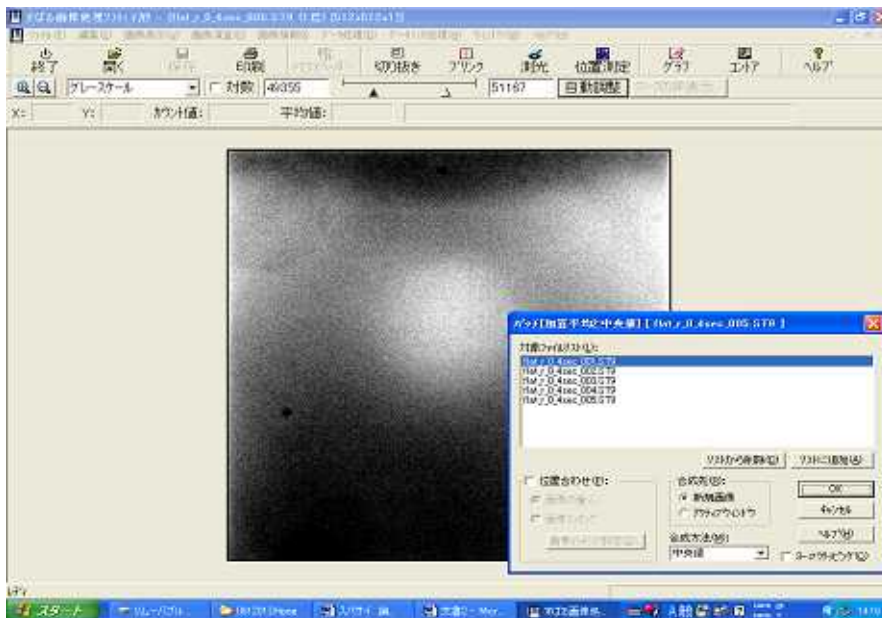


撮影途中に撮影機材の不具合により、1時間ほど撮影が行えなかった。

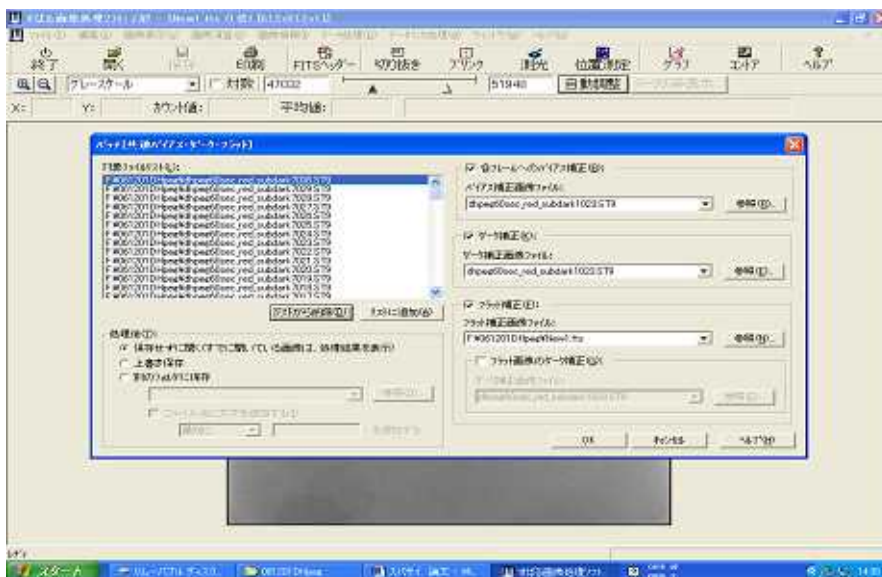
5. 解析

5.1. 画像処理

最初にフラットフレームの合成を行う。撮影時にダークフレームの処理は自動で行っている。そこで、画像解析ソフト Makali'i を用いて、フラットフレームの合成を行う。



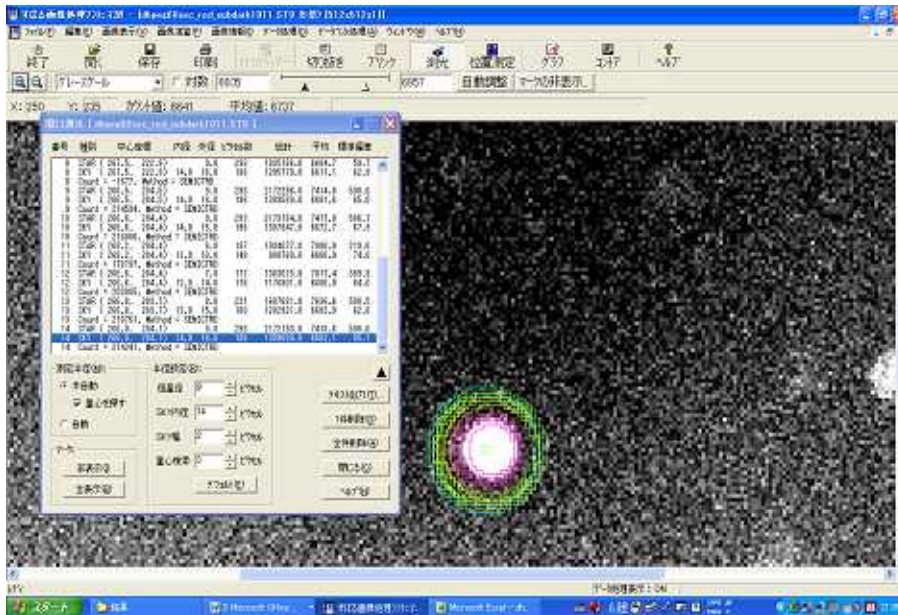
撮影画像を合成したフラットフレームで割る。



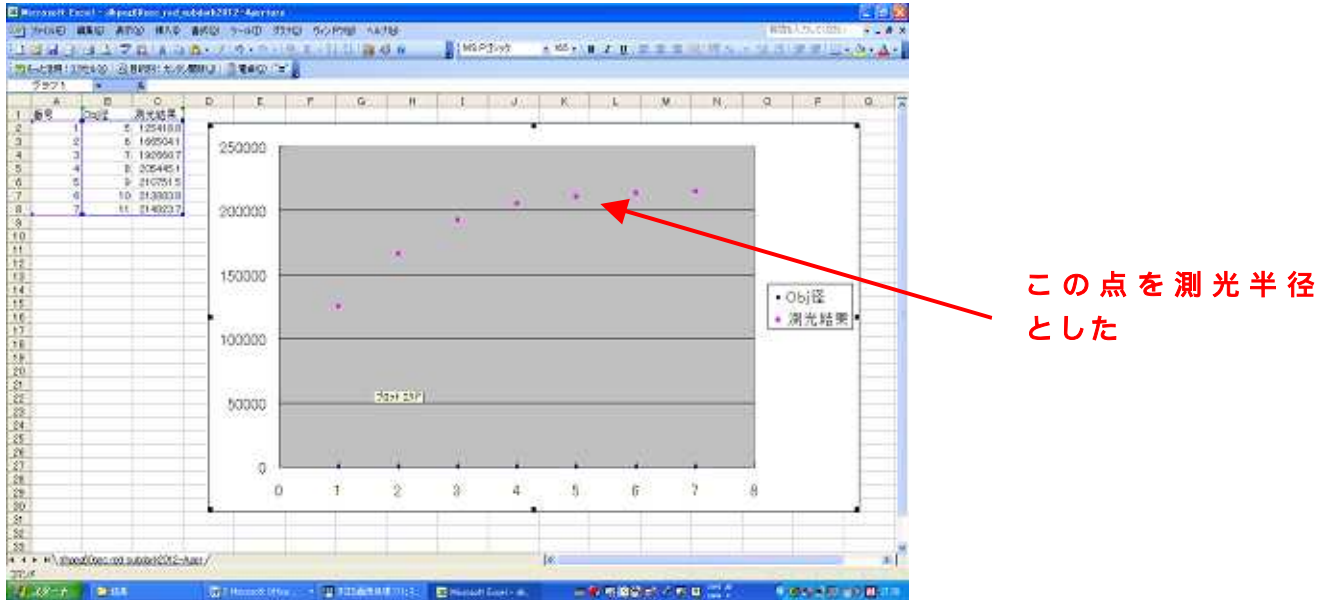
5.2. 変光グラフを作成する

5.2.1. 測光範囲の決定

まず 5.1 で処理を行った画像を用い、Makali'i を用いて測光を行う。半径設定の「恒星径」「SKY 内径」の数値を順に変更し、カウント値を出す。



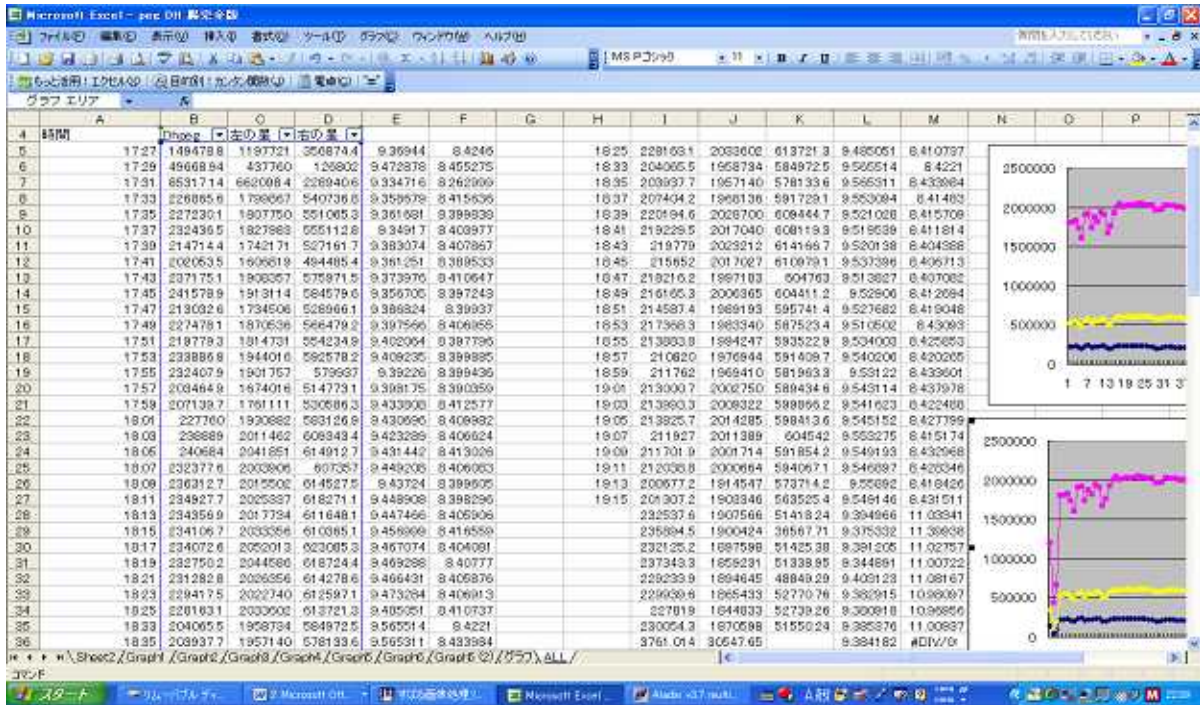
次に出したカウント値をグラフにする。そして、グラフが上がりきった点（変化が緩やかになった点）を測光半径とした。



この後、決定した測光半径に従って、それぞれの画像で測光を行った。

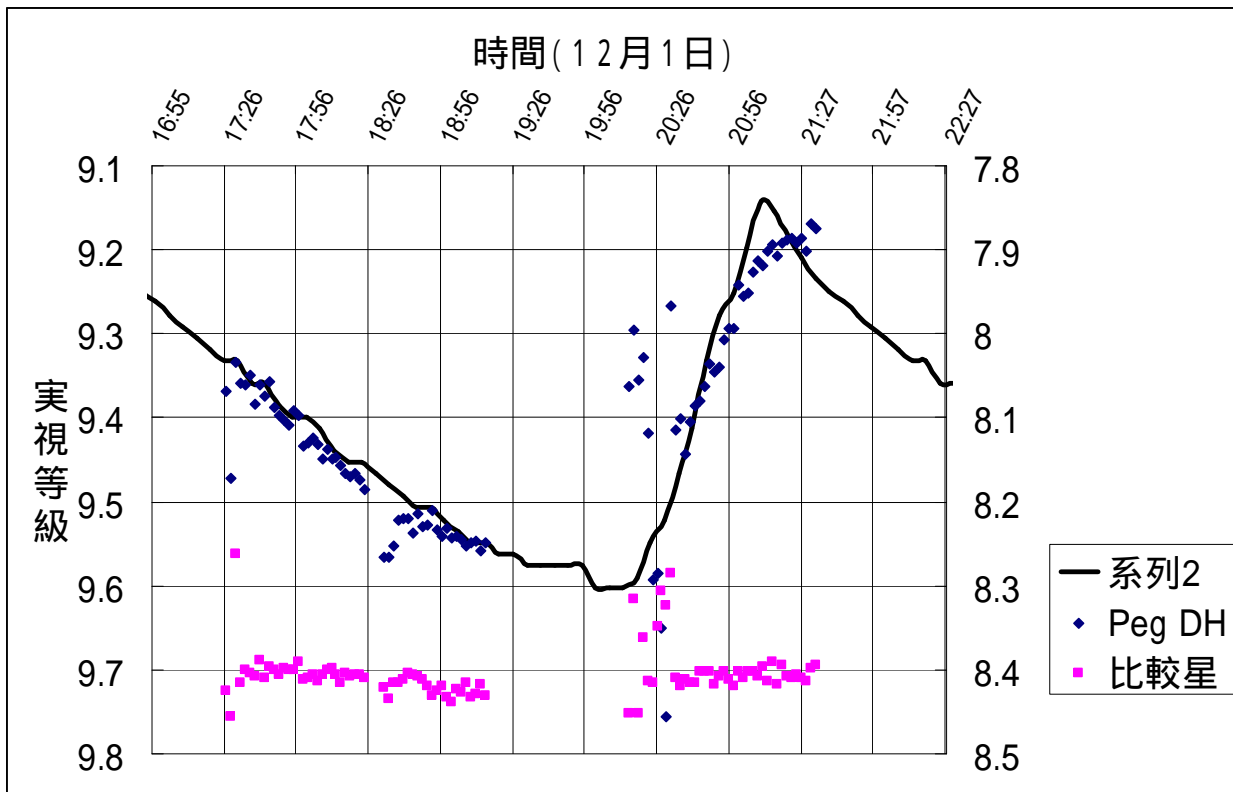
5.2.2. グラフの作成

5.2.1 の作業を比較星とチェック星にも同様に行う。撮影した画像をすべて決定した測光半径に従って処理し、データをエクセルにまとめた。



このデータを用いて、DH Peg と比較星の実視等級の時間経過による変化をグラフにした。

天体撮影途中に撮影機材の不具合により、1時間ほど撮影が行えなかった。このためチェック星のデータは用いないことにした。



6. 結論

6.1. DH Peg までの距離を求める (手順説明)

6.1.1. 絶対等級の求め方

まず、5.2 で求めたグラフから周期 (t) を測定し、次式により絶対等級 (M) を求める。

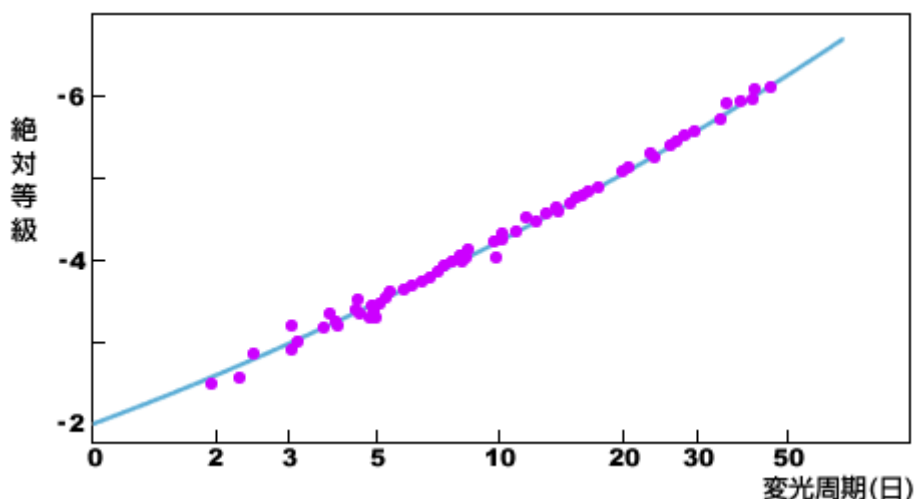
$$M = 0.1 + 3.0 \text{ Log } t$$

「先行研究」でも述べたように、セファイド変光星には種族 と がある。 の式は、種族 (DH Peg は種族 に属する) に対してのみ成り立つ式である。

種族 の式は、 $M = -1.4 - 3.0 \text{ Log } t$ となる。

また周期光度関係のグラフからも絶対等級 (M) を求められる。

図1 セファイドの周期光度関係



(国立科学博物館「宇宙の質問箱」)より引用

<http://www.kahaku.go.jp/exhibitions/vm/resource/tenmon/space/galaxy/galaxy05.html>

6.1.2. 距離の求め方

次に、観測による実視等級 (m) を測定し、次式から、距離 (D : パーセク) を求める。

$$\text{Log } D = 0.2 (m - M) + 1$$

6.2. 手順に従い実際に距離を求める

前に挙げた手順に従って求めていく。

6.2.1. 絶対等級を求める

5.2 で求めたグラフから、変光周期が 4 時間 45 分 (0.1979... 日) であることが分かった。したがって式に代入する。

$$M = 0.1 + 3.0 \text{ Log } (0.1979...)$$

$$M = -2.01055... -2.0 \quad \text{となった。}$$

この値は図1の周期光度関係のグラフからも求められる。

6.2.2. 距離を求める

まず実視等級 (m) を求める。

変光星は等級が常に変化する星である。そこで、観測で得られた実視等級の平均値(およそ 9.4 等)をこの変光星の実視等級として用いることにした。

絶対等級と実視等級を $\text{Log } D = 0.2(m - M) + 1$ に代入する。

$$\begin{aligned} \text{Log } D &= 0.2\{9.4 - (-2.0)\} + 1 \\ &= 3.28 \end{aligned}$$

$$D = \underline{1900 \text{ (pc)}}$$

この値の単位はパーセクなので光年に換算する。

1パーセク = 3.26 光年なので、DH Peg までの距離はおよそ **6200 光年** となった。

7. 数値確認

年周視差法による数値確認

ここまで、実際の観測に基づいたデータ(変光周期)を用いて、距離を求めてきた。そこで次に数値確認の意味も含めて、年周視差法で距離を求めてみた。データは SIMBAD データベースにある DH Peg の年周視差を用いた。

年周視差

カッコ内の数値は誤差平均

Basic data :
V* DH Peg -- Variable Star of RR Lyr type
 query around [] with radius 10 arcmin

Other object types: RR* (), * (BD, OCV, GENE, HIC, HSP, HSPS, usby98) , V* (V*, AM)

ICRS coord. (ep=2000 eq=2000):	22 15 25.6374 +86 49 21.431 (Visible) [17.68 8.49 88] A 1997AAA...323L...49P
FK5 coord. (ep=2000 eq=2000):	22 15 25.637 +86 49 21.43 (Visible) [17.68 8.49 88] A 1997AAA...323L...49P
FK4 coord. (ep=1950 eq=1950):	22 12 55.29 +86 34 24.2 (Visible) [180.08 49.73 88] A 1997AAA...323L...49P
Gal coord. (ep=2000 eq=2000):	859.1446 -33.2381 (Visible) [17.68 8.49 88] A 1997AAA...323L...49P
Proper motions, mas/y (error ellipse):	18.22 -1.63 A [2.03 0.38 81] 1997AAA...323L...49P
Parallax, mas	0.15 (1.42) A 1997AAA...323L...49P
Spectral type:	A4
Fluxes (2):	B 9.51 C "

http://simbad3.u-strasbg.fr/sim-id.pl?Ident=V*+DH+Peg&protocol=html&CooEqui=2000&NbIdent=1&Radius=10&Radius.unit=arcmin&output.max=all&o.catall=on&output.mesdisp=N&Frame1=FK5&Frame2=FK4&Frame3=G&EPOCH1=2000.0&Epoch2=1950.0&Epoch3=2000.0&Equi1=2000.0&Equi2=1950.0&Equi3=2000.0

方法 年周視差を用いる場合

年周視差が 0.15 ミリ秒なので $D(\text{パーセク}) = \frac{1}{\text{年周視差(秒)}}$ に代入して。

$$D = 6666\dots$$

ここで単位をパーセクから光年に換算すると

$$6666\dots \times 3.26 \quad \underline{\underline{22000 \text{ 光年}}} \quad \text{となった。}$$

しかしここで、データベースにある誤差平均 (1.42 ミリ秒) も考慮しなければならない。そこで、年周視差から誤差平均の和差した値をそれぞれ求め、距離を求める。

方法 年周視差と誤差平均の和を用いる場合

$$0.15 + 1.42 = \underline{\underline{1.57 \text{ ミリ秒}}}$$

よって $D(\text{パーセク}) = \frac{1}{\text{年周視差(秒)}}$ に代入して。

$$D = 636.94\dots$$

$$\underline{\underline{2100 \text{ 光年}}} \quad \text{となった。}$$

方法 年周視差と誤差平均の差を用いる場合

$$0.15 - 1.42 = \underline{\underline{-1.27 \text{ ミリ秒}}}$$

年周視差は負の値にはならないので、0 に限りなく近い数値であると仮定する。すると、求められる数値は 限りなく大きくなる。つまり地球から DH Peg までの距離は、果てし無く遠くなる。

このように SIMBAD データベースを用いて、年周視差法から距離を求めることができた。実際の観測で求められた 6200 光年という数値は、方法 の数値 (22000 ~ 2100 光年) の範囲内に収まっている。しかしながら、方法を考えると数値範囲が 2100 光年 ~ となり、疑問が生じる。

8. 数値確認

さらに別の方法で数値確認を行った。DHPeg がこと座 RR 型天体であると仮定して距離を求める。

8.1. こと RR 型天体とは

こと RR 型 (RRLyr) は球団星団の中に多く見られる為、星団型変光星とも呼ばれる脈動変光星である。一般的なセファイド変光星とは異なり、変光周期が 1 日以下と非常に短い。またサイズが小さく低光度であることも特徴的だ。もう一つ重要なことだが、こと RR 型はセファイド同様、同じ周期を持つ星は絶対等級が 0.5 とほぼ等しいという特徴を持っている。このことから、こと RR 型天体を用いて距離を導くことが可能だ。

8.2. こと座 RR 型天体であると仮定したときの距離

今回の観測により、DHPeg の変光周期が一日以下であったため、この天体をこと座 RR 型天体であると仮定した。こと座 RR 型天体は絶対等級が 0.5 であるという特徴があるので、そこから距離を求めることが可能だ。6 章で数値を求める際に使った式をここでも使う

$$\text{Log } D = 0.2 (m - M) + 1$$

$$\text{Log } D = 2.78$$

$$D = 600 \text{ (pc)}$$

よって **1900 光年**となった

9. 考察

実際の観測で求めた 6200 光年という数値について考察する。地球から DH Peg までの距離を示した資料は見つけることができなかった。そこで前節 7.1 の年周視差法を使って、その距離を求めてみたが、誤差が大きく、信頼性の低い数値となった。また、こと座 RR 型天体であると仮定して出した数値とも、大きな違いが出た。ここで今回の研究で数値に違いを生じさせた要因について考察してみよう。まず一番の大きな要因としては、変光周期を割り出す過程にあったといえる。SIMBAD データベースによると DH Peg の変光周期は約 0.256 日であるのに対し、今回の研究では約 0.198 日と 3 割近い違いが生じた。これは、観測日が 12 月であったため、DH Peg の観測時間が限られており 1 周期分の観測が出来ず、精度良く周期を決定できなかったためと考えられる。また、観測時に生じたトラブルにより、約 1 時間分のデータが取れなかったことも、結果に大きく影響しているだろう。また次の機会があれば、再度観測してみたいと思う。一方で、他の方法で距離を推測したときにも、誤差が生じている可能性が高い。年周視差法では、年周視差の値が正確ではなく非常に誤差の大きな数値だった。これは、DH Peg までの距離が非常に大きく、年周視差法を用いることが適さないためであった。二つ目の方法として、こと座 RR 型天体であると仮定して距離を算出したが、今回の観測からは DH Peg がこと座 RR 型天体であることを示唆するデータはなにも得られず、そのような仮定の妥当性については不明である。このようにさまざまな要因が重なり合い、大きな誤差を生じたと考えられる。

これらの問題については、機会があれば今後追加で観測を行うことで、精度を高めていきたいと考えている。

10. 謝辞

この研究を行うにあたって、松本先生には情報提供など様々な面で手助けをしていただきました。また夜遅くまで観測にお付き合いいただきありがとうございます。ここに感謝の意を表したいと思います。今までに経験したことのない研究で、とてもいい機会になりました。ありがとうございました。

11. 参考文献

- ・『月刊星ナビ』 出版：アストローツ 2004年9月
- ・『変光星』 著者：神田清 発行所：(株)恒星社厚生閣 1949年1月
- ・ The Aladin Sky Atlas
<http://aladin.u-strasbg.fr/aladin.gml>
- ・ 国立科学博物館
<http://www.kahaku.go.jp/exhibitions/vm/resource/tenmon/space/galaxy/galaxy05.html>
- ・ 深夜恒星講義
<http://www.fixedstar.jp/>
- ・ 天体の距離の観測
<http://www.kouka.ne.jp/~w1022077/distance1/distance.htm>
- ・ 冷却 CCD カメラによる撮影ワンポイント
<http://www.geocities.co.jp/Technopolis-Jupiter/2514/satuei10.htm#kiso0>