

## 「金星の太陽面通過による 1 天文単位の測定」

教師用ガイド

### 1. ねらい

金星の太陽面通過は、約 120 年間に 2 回という非常に珍しい現象であり、17 世紀のケプラーの時代から注目されてきた。この現象の観測により、地球―太陽間距離（1 天文単位：1 au）が何 km なのかを測定することができる。

本教材では、2012 年 6 月 6 日に観測された金星の太陽面通過のデータを使用し、1 天文単位の距離を測定する。

### 2. 歴史的経緯

太陽と地球の距離を求める試みは、紀元前 3 世紀のアリスタルコスまで遡る。しかし、1 天文単位の値を求めるためには、他の天体の大きさや距離比が必要であるため、科学技術が発展するまで精度良く求めることは困難であった。

ヨハネス・ケプラーは、自身の書いた「ルドルフ表」に基づき 1629 年に、1629~1636 年の惑星位置を計算し、その結果金星の太陽面通過は約 120 年周期で起こる事に気づいた。

その後、ケプラーの惑星運動理論で使われていた軌道データはジェレマイア・ホロックスにより改良され、1639 年秋に、金星の太陽面通過は約 120 年周期内に 2 度、しかも、その 2 度は 8 年間の内に集中して起こる事がわかった。

1663 年にジェームズ・グレゴリー（スコットランド）が、水星や金星の太陽面通過の観測により、地球―太陽間距離を正確に測れることを指摘した。これは、その後のハレーやジョウゼフ・ニコラ・ドリーールの提案（1761 年と 1769 年観測による視差を使った 1 天文単位の測定）につながった。

1874 年（明治 7 年）12 月 9 日には、イギリス、ドイツ、フランス、イタリア、ロシア、アメリカ、メキシコなどが世界 75 箇所もの地点で観測を行い、アメリカ（長崎）、フランス（長崎・神戸）、メキシコ（横浜）、は日本に観測隊を派遣した。

2004 年の金星太陽面通過については、日本の観測体制として、今回同様ライブ！ユニバースのチームによって「LIVE! VENUS 2004」によりマルチポイントでの観測とライブ中継が計画されたが全国的に天候が芳しくなかった。

2012 年の今回は様々な観測がおこなわれているが、特に「金星太陽面通過共同観測・画像共有プロジェクト」として実施された観測は、観測時刻・機材の仕様を揃えた協定観測がおこなわれた。

1 天文単位の値については、現在では、金星のレーダー観測など様々なデータを使用し決定され、2012 年 8 月の第 28 回 IAU 総会では、 $1\text{au}=149\,597\,870\,700\text{ m}$  とされている。

### 3. 使用するデータ

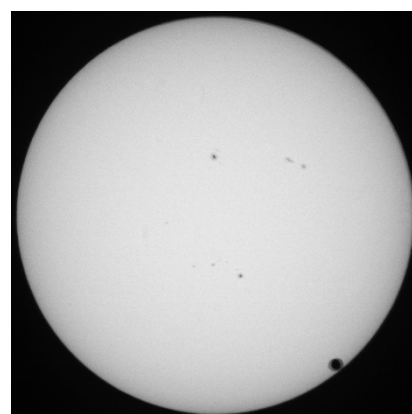
画像共有プロジェクト提供による以下のデータ

13 時 29 分 30 秒 JST（岐阜）・・・大西氏データ

11 時 29 分 30 秒 ICT（タイ）・・・LESA 校データ

（JST と ICT の時差は 2 時間である）

※この 2 つのデータは、画像サイズ、画像の向きが大きく異なるため、サイズ、向きをタイの画像と同じになるように調整している。（位置合わせは、X, Y のシフトのみでよい）



#### 4. 測定方法

- (1) 岐阜のデータ(gifu.fts)とタイ(thai.fts)のデータを、マカリを使用し「黒点」を基準にコンポジットし、同時刻の金星の位置が観測地によってズレていることを確認する。(太陽外縁は条件により合わせ難い)

※ 参考 岐阜-タイ間の距離の算出

金星太陽面通過時に太陽から地球を見たときの

地球上の2つの地点AとB(経度 $\lambda_1$ ,緯度 $\phi_1$ と経度 $\lambda_2$ ,緯度 $\phi_2$ )の間の見かけの距離(地球の中心を通り視線に垂直な面に投影した距離)を求める。

観測地A	年	2012
経度( $\lambda_1$ )	月	6
緯度( $\phi_1$ )	日	6
観測地B	時	4
経度( $\lambda_2$ )	分	30
緯度( $\phi_2$ )		
太陽天頂地点C	太陽位置	
経度( $\lambda_c$ )	赤経	74.55
緯度( $\phi_c$ )	赤緯	22.67
cos a	JF	0
sin a	JD	2456084.5
A	TU	0.12428474
cos b	GMST0	16.99
sin b	GMST	21.50
B		
d/R	地球半径(R)を	
	6378.137kmとして	d = 4228 km
	6400. kmとして	d = 4243 km

白色セルは入力パラメータ、黄色セルが計算結果

計算では 岐阜—タイ間を太陽から見たときの距離は 約 4230 km となる。

- (2) 画像解析ソフト「マカリ」により、金星の位置のずれを計測する。

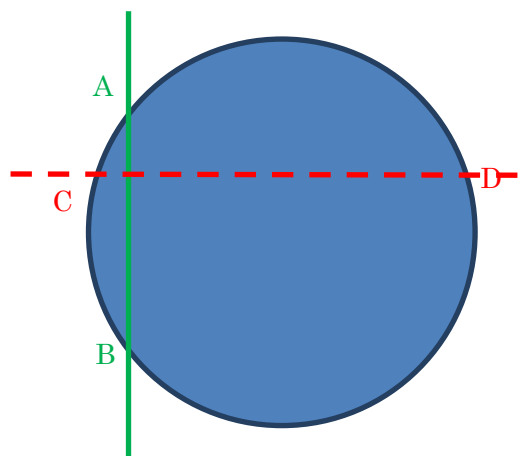
2つの金星の影の中心間の距離を求める方法については、大気の影響で真円になっていないため誤差を含む値になるが、それぞれ工夫して求めるように指示する。後の計算で、この時の値が大きく影響することがわかるので、観測精度は大気による影響が大きいことを知ることができる。

#### 【参考：金星のズレの求め方の例】

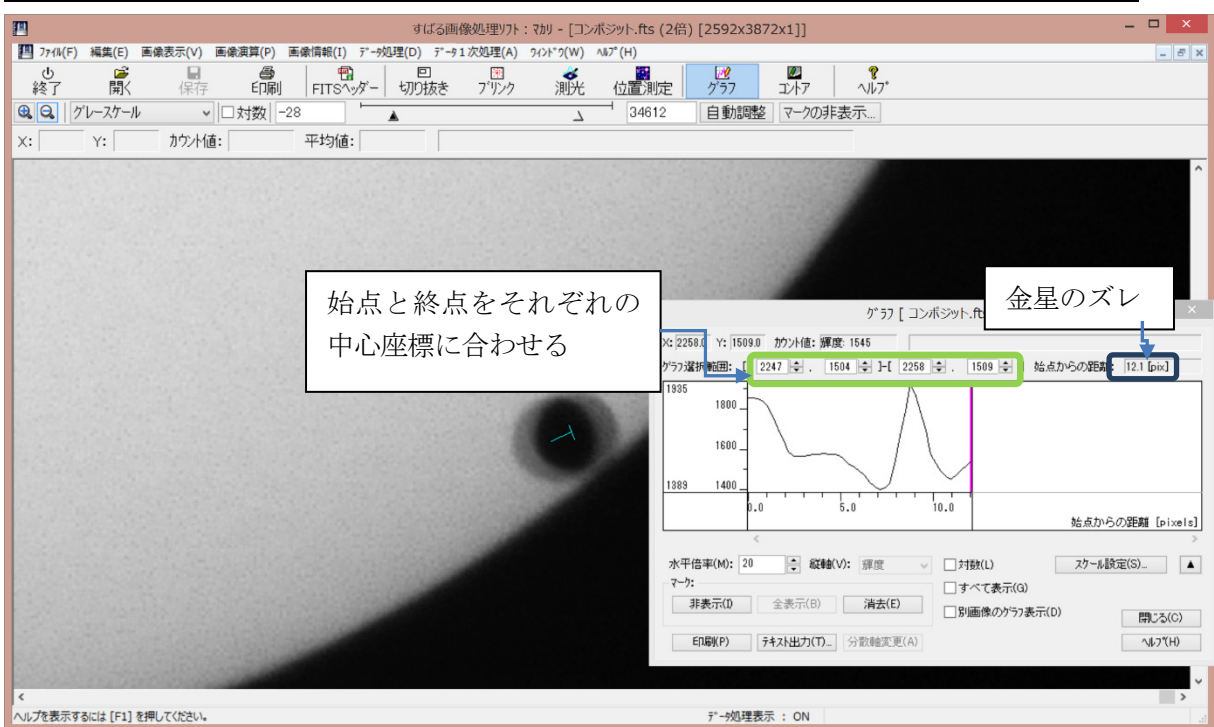
方法1 コンポジット画像を使用する

(a) グラフツールでの求め方

- ① グラフツールで縦方向、横方向の適当な線分を切り、A-Bの中点のY座標、C-Dの中点のX座標( $X_{cd}$ ,  $Y_{ab}$ )が円の中心となる。岐阜、タイの金星の影の中心を求め、その距離を測定する。



実習：距離梯子 1 『金星の太陽面通過による 1 天文単位の測定』



②グラフツールの選択範囲を各金星の影の中心に設定し、始点からのズレを読み取る(上図)。

(b) 三平方の定理の利用

各金星の中心座標から、三平方の定理を利用し距離を計算する。

方法2 各画像を独自に比較する

- ①コンポジットの要領で、各画像の黒点の位置が一致するように画像の移動を行う。
- ②黒点の位置がそろった、岐阜とタイの画像の金星の影の中心を方法1(a)①でそれぞれ求める。
- ③黒点を使用して求めた太陽画像のズレと各画像の金星の中心座標から三平方の定理を利用し、金星のズレが何ピクセル (pix) か計算する。

(3) 地球-太陽間の距離を計算する。以下に計算例を示す。

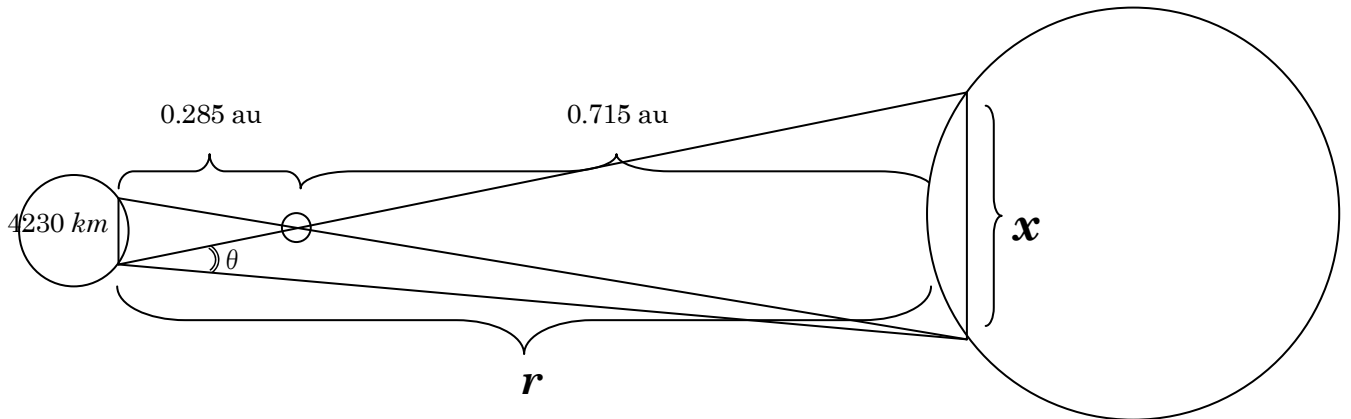
2012年6月6日の地球-金星：金星-太陽の距離比率は、理科年表2012の暦65頁(金星日面経過)の視差より2.85：7.15であることがわかっている。

岐阜からタイまでの距離は4230 kmなので、太陽面に落ちた影のずれを  $x$  (km) とすると

$$2.85 : 7.15 = 4230 : x \quad \text{であるので}$$

$$x = 10612 \text{ km} \quad \text{となる。}$$

(次頁の図を参照)



一方、データでの岐阜とタイの金星の影のずれが 12.0 pix であるとする、この日の太陽の視直径は 1891.4 秒角、用いた画像の太陽直径は 1491 pix であるので、 $\theta$  ( $x$  を地球から見こむ角) は、 $1891.4 \times 12.0 / 1491 = 15.2$  秒角である。

よって、地球-太陽間の距離を  $r$  (km) とすると、半径が十分に大きく角度が十分に小さいとき、円弧と弦の長さは近似するので

$$2 \pi r \times (15.2/3600)/360 = 10612 \quad \text{より}$$

$$r = 1.44 \times 10^8 \text{ km} \quad \text{となる}$$

### (注 1)

当日の地球-太陽間の距離は 1.015 天文単位であり(理科年表 2012 の暦 14 頁)、上で求めた  $r$  は正確には 1 天文単位と異なる(上の値から計算すると 1 天文単位は  $1.44/1.015$  より  $1.42 \times 10^8$  km となる)。授業としては、最後にこのことを指摘して 1 天文単位を再計算させることも考えられるし、もともとの計算精度が有効数字 3 桁程度であることを考慮して、 $r$  (地球-太陽間の距離、ほとんど 1 天文単位に等しい)を求めさせたところで授業を終了とすることも考えられる。

### (注 2)

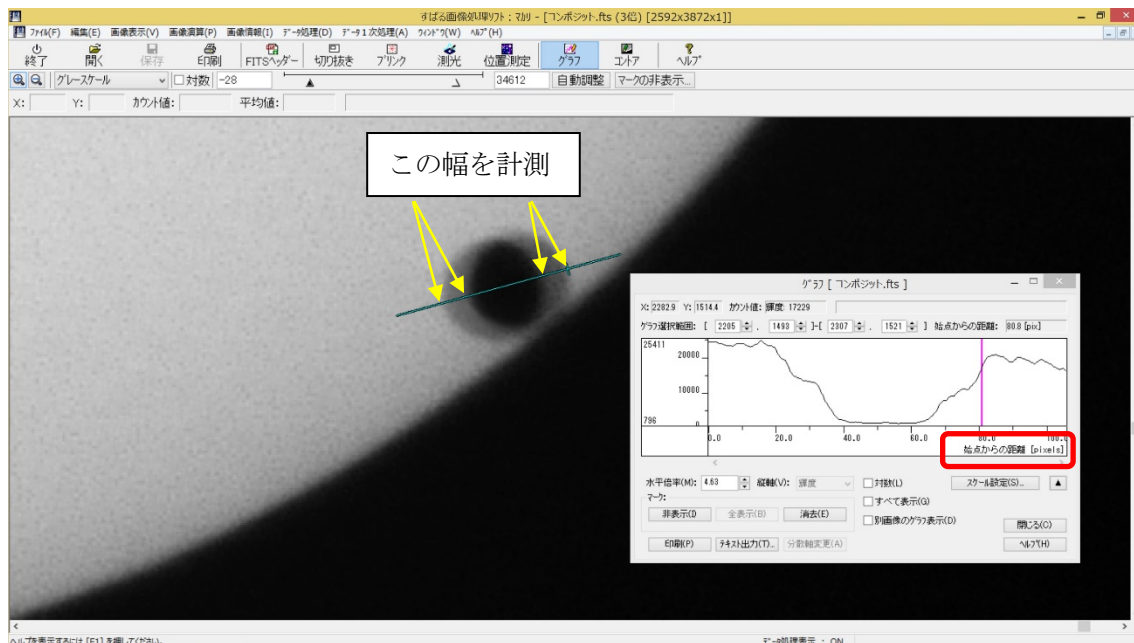
#### 使用データの作成について

- ① 使用したデータは、RAW 画像をステライメージでカラー現像後 3 色分解を行い、G フィルターのデータ (FITS) のみを使用した。(ステライメージは 3 色分解をする際、FITS データとして読み込む) RGB すべてのデータをそのまま FITS 化する方が、素子間の補完が無いためシャープな画像が得られるが、サイズと向きを変更後コンポジットする際、異なったフィルターが重なると非常に見難い画像となるので注意が必要である。

注) 無料ソフトに RAW2FITS があるが、こちらは画素間の補完無しに RGB の分解画像を出力するため、R と B は 4 分の 1、G は 2 分の 1 の解像度になる。測光などに使用する場合は、こちらの方が適している。

- ② 画像サイズの調整は、2 つの画像の黒点間をグラフで測り解像度の比を測定し、解像度の高い方の画像を縮小する形で調整した。画像サイズの調整は、画像の向きの調整前に行う。

## 金星のずれ測定方法（簡易バージョン）



- ① 金星の影の部分の中心を横切るようにグラフ機能でスライスする（上図）。
- ② 影のずれの部分（重ならない部分）の間隔を「始点からの距離」を利用して計測する。

例 始点からの距離の両端が 80 pix と 100 pix の場合

$$100 - 80 = 20 \text{ pix}$$