

14 2004年金星太陽面通過の観測と1天文単位の算出

1 研究の動機・目的

私たちは2004年6月8日に太陽と地球の間に、内惑星である金星が通り抜け、太陽面上を金星の影が東から西へ通過するという金星太陽面通過(図1)が起こることを天文雑誌やインターネットの天文サイトで知った。



図1 金星の太陽面通過の模式図

この現象を文献で調べてみると、前回観測されたのは130年前、次回観測されるのは8年後と頻度の低い現象であることがわかった。そこで、この珍しい天文現象を是非観測したいと思い、校舎の屋上で実際に観測に望むことにした。

さらに、この現象について文献で調べてみると、前回1874年の金星太陽面通過では、世界中の天文学者が競って1天文単位の長さを求めたことを知った。そこで私たちも、自分たちで行った観測の結果を用いて、1天文単位の長さを求めることができないだろうかと思い、この計算に挑戦してみることにした。

2 金星の太陽面通過とは

地球と太陽、そして地球の公転軌道の内側を公転する内惑星である金星が、地球・金星・太陽の順で一直線上に並ぶときに金星の太陽面通過が観測される(図2)。

地球と金星は公転しており、一直線上に並ぶという場面

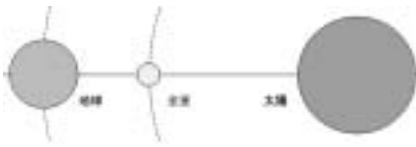


図2 金星の太陽面通過が観測されるとき
の地球・金星・太陽の位置関係
(公転軌道面に対して垂直な方向から見る)

に出くわすチャンスは、地学の教科書にある会合周期の計算によると、1.6年に1回の割合となる。よって金星の太陽面通過は1.6年に1回の頻度と比較的頻繁に観測されるはずである。

しかし、先ほど述べたように、今回は130年前、そして今回は8年後である。このように金星の太陽面通過が稀な現象である理由は、地球と金星の公転面が同平面上にはなく、3.4度傾いているからである。そのため、地球・金星・太陽が一直線上に並ぶのは、地球の公転面と金星の公転面が交わる交線上に地球、金星が並ぶ時、すなわち(図3)のような位置関係の時だけである。この位置関係に並ぶのは極めて希であり、よって太陽面通過は、金星の会合周期である1.6年毎に必ず起こる現象とは限らないのである。

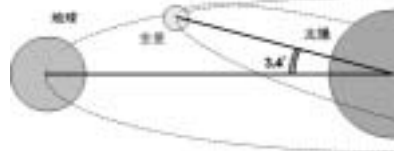


図3 地球と金星の公転面の傾き(この位置関係のとき、金星の太陽面通過は観測されない)

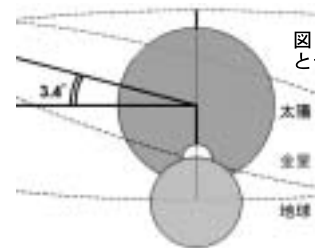


図4 金星の太陽面通過が観測されるとき
の地球・金星・太陽の位置関係

3 金星の太陽面通過の観測

私たちの観測は浜松北高校屋上(世界測地系北緯34°43′05″東経137°43′01″、海拔43m)で行った。私たちの観測装置は(写真1)の通りである。用いた望遠鏡の口径は102ミリ、焦点距離は820ミリ(高橋製作所製FS-102)である。望遠鏡が常に太陽の方向を向くように、赤道儀と自動追尾装置を用いて太陽を追いかけた。

時間を追った連続記録は高感度CCDカメラ(WATEC社製NEPTURE100・写真2)で撮影して、これを家庭用デジタルビデオカメラ(SONY社製)に記録した。また、静止画像はデジタルスチールカメラ(日本光学社製COOLPIX4500)で行った。

観測データとして大切となる時刻を得るためには、デジカメ内蔵の時計を用いたが、ずれがないかを確認するために実際の電波時計（CUTUZEN社製・写真3）を撮影して時刻の補正を行った。また、強烈な太陽光を減光するため、ND-400 フィルター2枚（写真4）を望遠鏡の対物レンズの前に取り付けた。このために塩ビ管を加工して、アダプターを製作した。観測時間は準備の時間も考慮し、約1時間前の午後1時からのスタートとした。

観測日当日はあいにくの曇天だったが、太陽面に初めて金星が接触する第一接触を確認することができた。金星が太陽面の内側に入り、内接する第二接触は、残念ながら雲が厚くなり確認することができなかった。

写真5は実際にデジカメで撮った太陽面を通過している金星の影である。金星の影の輪郭が比較的是っきりと確認された。



写真1 観測装置全貌（北高屋上）



写真2 高感度 CCD カメラ



写真3 記録用ビデオカメラ・電波時計



写真4 ND-400 フィルター



写真5 金星の太陽面通過の様子
(デジタルカメラによる)
2004/6/8 15:30:19

4 1天文単位の計算

前回1874年の太陽面通過では、世界の天文学者達が競って1天文単位の長さを求めたことが知られている。そこで、私たちも、高校物理や数学の範囲で1天文単位、すなわち1AUの長さを求めることにした。さらに、太陽の大きさ、金星の大きさなどの計算も試みて、実際に知られている値との比較をした。

天文単位算出までの大まかな流れは次の通りである。

- ① 金星の太陽面通過の時の地球、金星、太陽間の距離の比を出す。
- ② 観測地点を2つとり、その2地点の距離を算出する。
- ③ ①と②から、定めた2地点から太陽へ投影された2つの金星の影の間の距離を求める。
- ④ さらに③を用いて、太陽の直径を算出する。
- ⑤ 太陽の直径④から、1天文単位を求める。

①ー1 1AUに対する太陽～金星間の距離の比

まず、金星・地球の公転は同平面上、円軌道であると仮定した。本当は地球も金星も楕円軌道で、同一平面内にはないが、1天文単位という大きな値を扱うにあたり、この仮定での誤差は微量なものだと考えたからである。始めに太陽面通過の時の太陽から金星までの距離と金星から地球までの距離の比を三角測量によって求めた。ここで太陽から金星までの距離SV、金星から地球までの距離をVEとする(図5)。最初に時間による変化が無いSVについて検討する。

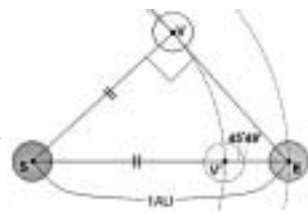


図5 太陽～金星：金星～地球 算出

地球から見て、金星が太陽に対して最も離れた角度、すなわち直線VEが金星の軌道の接線となる位置を考える。2004年版天文年鑑によると、観測日に最も近い日にこの位置関係になったのは3月30日であり、この時の太陽と金星の角距離が45度49分であることがわかった。さら接線より角SVEが90度（⊥接線）であることから、三角比によってSVは

$$SV = 1AU \times \sin 45^\circ 49' = 0.717AU$$

となる。

①-2 太陽面通過時における金星～地球間の距離の比

続いて、太陽面通過の時の金星から地球までの距離を求める。三つの天体が一直線上に並んだ時の金星の位置を V' とする(図5)。

この時 $V'E$ は

$$1AU - SV = 0.283AU$$

と求まる。よって、太陽面通過の時の SV と $V'E$ の比は、 $0.717:0.283$ と求められる。

∴ 太陽金星間の距離：金星地球間の距離

$$= SV' : V'E = 0.717 : 0.283$$

② 2地点の距離

1天文単位を求めるには、地球上の十分に離れた2ヶ所の同時刻の観測画像が必要となる。1ヶ所は私たちが観測を行った浜松北高校校舎屋上である。もう1ヶ所については、はじめ同様の観測を行っている全国の高校の天文関係クラブの観測データを使用しようと考えていたが、あいにくの曇天、雨天でほとんどの高校は観測できなかったことがわかった。また、観測できたとしても、あまりにも近すぎて計算に誤差が生ずる可能性が高い。さらに、私たちも、実際に記録できたのは、14時10分から15時40分までのわずか90分間で、それ以降は雨天になり観測は不可能になった。また、この90分間も、80%以上は雲に覆われていたのが実情である。この限られた時間内に同時観測をした国内の高校は皆無に近と考え、もう1ヶ所については、インターネットで検索して、世界中から北高とほぼ同時刻に撮影された金星太陽面通過の画像を探した。その結果、オーストラリアのパース天文台で15時30分前後に撮影された画像を発見した。(写真6)がその画像である。浜松とオーストラリアは約10,000km離れているので十分に離れた2地点といえる。そこで、この浜松北高校屋上とオーストラリアパース天文台の画像を用いて、2地点の距離を求めてみることにした。

北高校舎を地点A(北緯35° 東経138°)、パース天文台を地点B(南緯32° 東経166°)として、ABの距離を実際に求める。地球の半径を6371012mとし、地球の赤道面をx-y面、グリニッジ天文台を通る経線にx軸をとる(図6)。

それぞれの経緯と球面座標の計算式

$$\begin{aligned} 2 \text{ 点の距離 } AB &= \text{地球の半径} \cdot \{(\cos A \text{ 北緯} \cdot \cos A \text{ 東経} - \cos B \text{ 北緯} \cdot \cos B \text{ 東経})^2 + (\cos A \text{ 北緯} \cdot \sin A \text{ 北緯} - \cos B \text{ 北緯} \cdot \sin B \text{ 北緯})^2 + (\sin A \text{ 北緯} - \sin B \text{ 北緯})^2\} \\ &= 6371012 \{(\cos 35^\circ \cdot \cos 138^\circ - \cos 32^\circ \cdot \cos 116^\circ)^2 + (\cos 35^\circ \cdot \sin 35^\circ - \cos 32^\circ \cdot \sin 32^\circ)^2 + (\sin 35^\circ - \sin 32^\circ)^2\} \\ &= 9316000m \end{aligned}$$

よって、ABはおおよそ 9316km と算出された。



写真6 パース天文台の画像 2004 / 6 / 8 14:01:55



図6 2点の距離AB

③ 太陽に投影された金星の像の距離

A地点・B地点から太陽へ投影した金星をそれぞれ $A'B'$ とする(図7)。ここで、三角形ABVと三角形 $A'B'V$ が相似である。さらに、AB間の距離と $A'B'$ 間の距離、金星・地球間の距離と金星・太陽間の距離がそれぞれ対応しているため、 $A'B'$ は $AB \times 0.717 \div 0.283km$ となり、先ほど求めたABの距離を代入すると2地点から太陽に投影された影の距離 $A'B'$ はおおよそ24,000kmと求まった。

$$0.283AU : 0.717AU = AB : A'B' (\because \triangle ABV \sim \triangle A'B'V)$$

$$A'B' = AB \times 0.717 / 0.283 \quad [km]$$

$$AB = 9316 \text{ km より}$$

$$A'B' = 9316 \times 0.717 / 0.283 \quad [km]$$

$$= 23602 \text{ km}$$

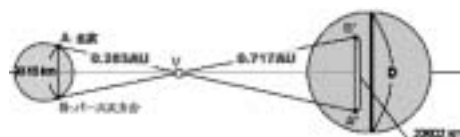


図7 地球上の2点間の距離と太陽に投影された金星の像の距離の関係

④ 画像上の金星のずれ・太陽の直径

続いて、太陽の直径の長さを算出する。先ほど求めた2地点から太陽に投影された影の距離は、

それぞれの観測のずれと対応している。ここで、北高での観測とパース天文台での観測の2枚の画像を東西南北の方位を一致させて合わせてみる(図8)。2地点から見た金星の太陽面での位置は、見る方向が異なっているため、当然一致しない。この差が視差となって現れる。このときの金星の視差は私たちがパソコンで印刷した画像上で25mmだった。一方、画像に描かれている太陽の縁(円弧)を延長して太陽全体を描くとこの円の直径は画像上で1440mmであった。ゆえに画像上での太陽の半径1440mmに対して、画像上での金星の視差は25mmとなる。

一方、実際の太陽の直径(D):実際の金星の視差(A' B')=画像上での太陽の直径:画像上での金星の視差なので、

$$\begin{aligned} D : A' B' &= 1440 : 25 \\ \textcircled{3} \text{の } A' B' &= 23602 \text{ [km]} \text{ を代入して} \\ D : 23602 &= 1440 : 25 \\ \therefore D &= 23602 \cdot 1140 / 25 \\ &= \underline{1359527 \text{ km}} \end{aligned}$$

よって太陽の直径はおおよそ1360000kmであることが分かった。



図8 北高屋上の金星とパース天文台の金星を重ね合わせた画像

金星の大きさが異なるのは画像処理上の誤差である。

⑤ 1天文単位の算出

ここで、1天文単位の算出に移る。まず太陽の視直径を求める。望遠鏡を太陽に向けて固定し、太陽の像の赤道の西から東までが、接眼レンズ内の視野の1点を日周運動により通過する時間を測定すると約124秒かかる。このことから太陽の視直径は(124秒÷(24×60×60)秒)×360°=0.516°であることがわかる。また、2004年度版天文年鑑で調べても同様の値であった。

ことから、太陽の直径を角度で求めた値(視直径)は0.516°であり、その半分の視半径は0.516°/2=0.258°である。これを図示したものが図9である。

ところで、図9の直角三角形△EOSにおいて

$$\begin{aligned} \tan 0.258^\circ &= \text{太陽の半径} / \text{太陽地球間の距離} \\ &= (D/2) / 1\text{AU} \\ &= D / 2\text{AU} \\ \therefore 1\text{AU} &= D / 2 \cdot \tan 0.258^\circ \end{aligned}$$

となる。

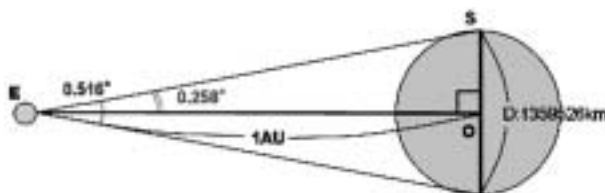


図9 太陽の直径と視直径、1天文単位の関係

これに先ほど④で求めた太陽の直径

D = 1359526 km と三角関数表から $\tan 0.258^\circ = 0.004503$ を代入すると

$$\begin{aligned} 1\text{AU} &= 1359526 / 2 \cdot 0.004503 \\ &= \underline{150958585 \text{ km}} \end{aligned}$$

よって1AUは150958585kmとなり、1天文単位が算出された。これは149597870 kmという実際の値に対して、誤差+0.91%と極めて近い値になった。

⑥ 地球～金星間の距離・金星～地球間の距離の算出

1天文単位の距離を用いると、太陽と金星の距離、太陽面通過が起きている時の金星と地球の距離、つまり地球と金星の最短距離を求めることができる。地球、金星、太陽の中心をそれぞれE、V、Sとした時、①-2より地球と金星間の距離EVは0.283AU、金星と地球間の距離は0.717AUと分かっているので、

$$1\text{AU} = 150958585\text{km より}$$

$$EV = 0.283\text{AU} = 0.283 \times 150958585 = 42721280 \text{ km}$$

$$VS = 0.717\text{AU} = 0.717 \times 150958585 = 110314362 \text{ km}$$

よって地球から金星までの距離は約4000万km、金星から太陽までの距離は約11000万kmと算出される。

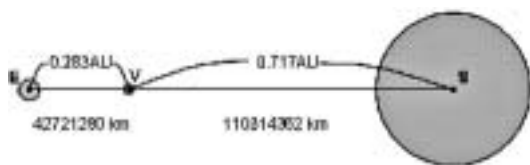


図 10 地球金星間の距離と金星太陽間の距離の関係

⑦ 金星直径の算出

地球から見て、太陽と金星が全く同じ大きさに見えると仮定する。

$$\triangle EKL \sim \triangle EIJ$$

相似比は天体間の距離に対応しているのので

$$D:D' = 1:0.283$$

$$\therefore D' = 0.283 \cdot D$$

ここで $D = 1359527$ [km] より

$$D' = 384746$$
 [km]

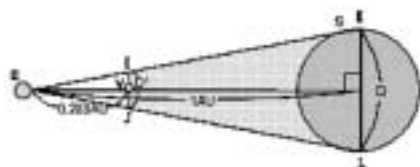


図 11 金星の直径と太陽の直径の関係

この値は実際の金星の大きさを考えると、仮定した金星は画像上では太陽の大きさと同じになる。しかし、実際は金星は太陽よりずっと小さい。



図 12 金星と太陽の直径の画像

そこで画像上での太陽と金星の直径の比を出す。画像の円上の3点から垂直二等分線を引き、太陽中心を求めた。

それにより太陽の直径 97mm、金星の直径 3mm と計測された。よって画像上での太陽と金星の直径の比は 97:3 になる。ここで先ほど述べたように仮定した金星は画像上では太陽の大きさと同じになるので、実際の金星の大きさを V としたとき、



図 13 金星と太陽の直径の模式図

$$D' : V = 97:3$$

$$V = 3 \cdot D' / 97$$

ここで $D' = 384746$ [km] より

$$V = 11899$$
 [km]

これより、金星の直径は約 12000km と求まる。

5 まとめ・比較

それぞれ求めた値を実際の値と比較した。実際の値は 2004 年度版天文年鑑によるものである。それぞれ観測条件の違いや、「公転軌道を円軌道と考える」などの計算方法の仮定があったが、誤差が最大でも 3% とかなり実際と近い値が求まった。

表 観測から算出した結果と理論値との比較

	算出した値[km]	実際の値[km]	誤差[%]
1天文単位	149588885	149597870	+0.91%
太陽直径	1359527	1392600	-2.33
金星直径	11899	12104	-1.69
太陽～金星距離	108237305	108208627	+0.00266
金星～地球最短距離	42721280	41389243	+3.21

6 参考資料

(文献)

- ・星ナビ 2004 年 5 月号
- ・ " 6 月号
- ・天文年鑑 2004 年度版 文堂新光社

(web サイト)

- ・LIVE!UNIVERS URL : <http://www.live-universe.org/>
- ・パース天文台(PERTH OBSERVATORY) URL : <http://www.wa.gov.au/perthobs>