

# 水星と金星の太陽面通過による 1 天文単位の測定教材開発

大西浩次 (長野工業高等専門学校)

## Determination of 1AU by the Parallax Measurement of Mercury and Venus Transit between the Earth and the Satellites

Kouji Ohnishi (Nagano National College of Technology)

### Abstract

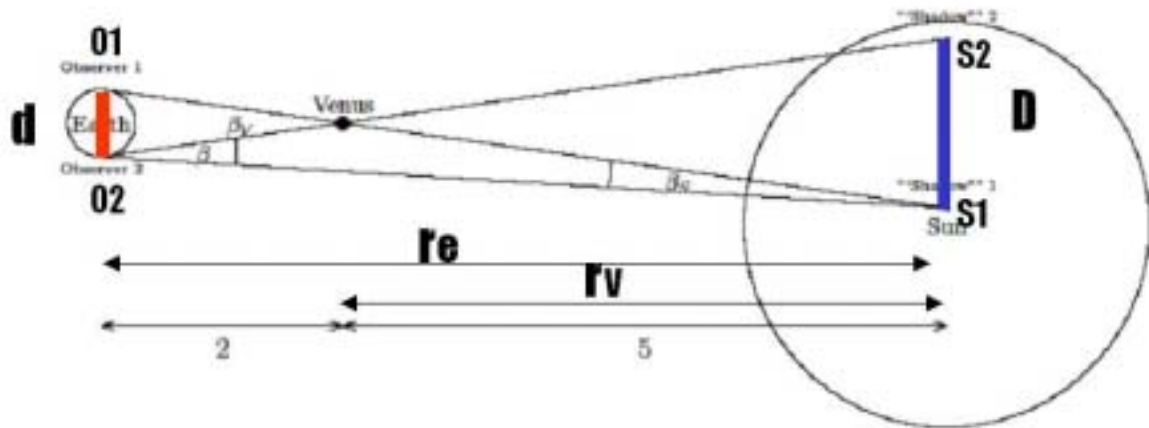
The measurement of 1 Astronomical Unit (AU) is very important because of the first step of "distance ladder". On June 8, 2004, the transit of Venus was observed in Japan after an interval of 130 years. This is the first Venus transit after the *space age*. We show the new idea to determine the 1AU using the parallax measurement of Venus transit by the satellites. The first is using the images taken by SOHO (Solar & Heliospheric Observatory), which is 1.5 million kilometers sunward of the Earth in a halo orbit around the L1 Lagrangian point. The baseline between the Earth and SOHO is more than 90 earth radii at Mercury transient in 2003, so we can easily measure the parallax of sun. The second is the images taken by TRACE (Transition Region and Coronal Explorer) that is the polar satellite. Due to polar orbital motion of satellite, about 90 min modulation of position of Venus transient was observed. From the magnitude of such modulation, we can derive the sun parallax.

### 1. はじめに

2004年6月8日、日本で約130年ぶりの金星の太陽面通過が観測された。1677年、E. Halleyは、金星の太陽面通過の測定を使った太陽視差の測定法、すなわち、1天文単位(AU)の測定法を提案した。この1AUは、天体の"距離はしご"の第1段目としてたいへん重要な物理量であり、前回(1874年)の金星の太陽面通過の際は、アメリカ、フランス、メキシコの各観測隊が日本でも観測を行っている。当時、3桁程度であった1AUの距離精度は、レーダー観測やドップラートラッキングなどの計測技術によって、現在では11桁にも達している。しかし、この現象の教育価値は今日でも大きい。さらに、今回の金星の太陽面通過は、人工衛星時代になって初めての現象であり、例えば、太陽観測衛星SOHO(Solar & Heliospheric Observatory)を使うと、ベースラインが地球上より2桁も大きい観測が可能になる。それゆえ、金星の太陽面通過を使った観測手法でも、以前よりはるかに良い精度で測れる可能性がある。さらに、視差が大きく見える事より、教材としても比較的手軽な測定で、そこそこの精度が得られると期待する。そこで、本研究では、地上、および、人工衛星からのデータのアーカイブデータを利用して、(1)地上の複数点の観測データによる1AU測定教材の開発、(2)今回、新たに提案する、(i)地上とL1にいる人工衛星からの視差による1AU測定、および、(ii)極軌道衛星の軌道運動による視差による1AU測定の教材開発の可能性について報告する。

## 2. Halley のアイデア

太陽までの距離を測る試みは、ケプラーにより提案されているが、実用的な方法はハレーにより提案された金星の太陽面経過を使う方法である。図 1 のように、太陽面上のあるわかっている距離 (D) の見かけの大きさ (α) が測定で出来れば、距離がわかる。いま、金星の日面通過時の金星までの距離 (r<sub>E</sub>-r<sub>V</sub>) と太陽金星間の距離 (r<sub>V</sub>) は、ケプラーの法則から分かっている (計算できる)。地球上の 2 点間の観測者 1, 2 の距離 d を使えば、三角形 O1-V-O2 と S1-V-S2 が相似なので、D の実距離が d の (1/1-α) 倍であることが分かる。ただし、α は距離の比である。これより、太陽の視直径を基に S1-S2 の見かけの角の大きさ (α) を測れば、1 AU の距離が式のように求まる。



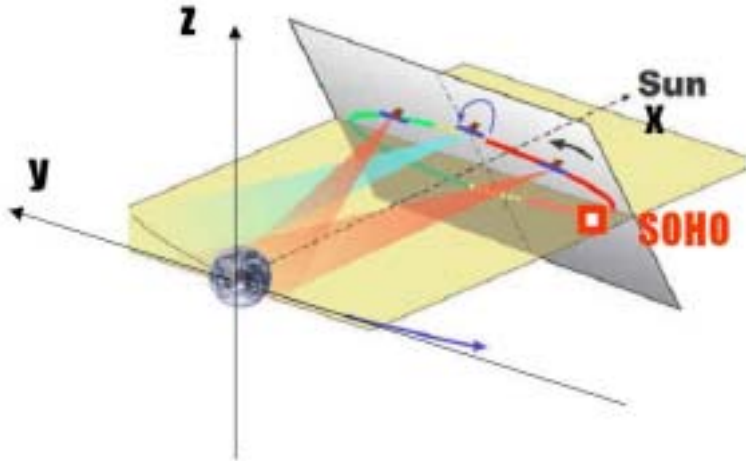
$$\frac{d}{r_e - r_v} = \frac{D}{r_v} \quad \Rightarrow \quad D = \frac{\alpha}{1 - \alpha} d \quad \alpha \equiv \frac{r_p}{r_e} \quad \text{Using Kepler's Third Law}$$

$$r_e = \frac{D}{\beta} \quad \Rightarrow \quad r_e = \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \times \left( \frac{d}{\beta} \right)$$

図 1 Halley のアイデア

## 3. SOHO による水星の太陽面経過

はじめに、2003 年 5 月 7 日の水星の太陽面経過における SOHO と地上のデータを解析してみた。SOHO は地球と太陽の間、L1 にある太陽観測用衛星であり、同日の地球と SOHO とのベースラインは、地球の公転方向に地球半径の 90 倍程度 ( $y = 5.8 \times 10^5 \text{ km}$ ) であった。



$$(x,y,z)=[1.5 \times 10^6 \text{ km}, -5.8 \times 10^5 \text{ km}, -8.0 \times 10^4 \text{ km}]$$

図2 2003年、水星の太陽面経過時のSOHOと地球の位置関係

SOHOの軌道は、人工衛星からのデータが太陽電波に影響を受けないように、L1を中心に常に地球から見て太陽から6度以上はなれたHALO軌道上にいる(図2参照)。L1は地球と太陽の間、地球から1/100AUほど太陽寄りの位置である。ここで、X軸を太陽側、Y軸を反公転方向、Z軸を黄道方向に取っている。図3のは、水星の太陽面通過時のSOHO位置である。このときのSOHOは、Y軸方向に地球半径の90倍(公転方向に)、Z軸方向に、約10地球半径(S極側)ずれていた。

(1) SOHOのy軸のずれ(地球公転方向)による視差

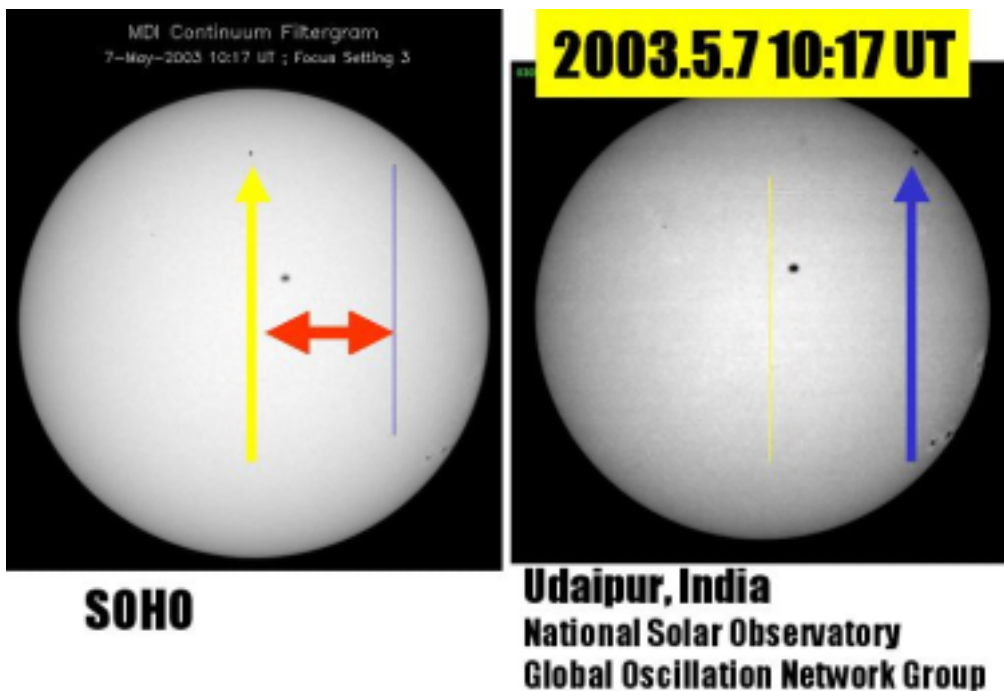


図3 水星の太陽面経過時のSOHOとインドでの同時刻の観測画像

SOHOのHP、National Solar Observatory Global Oscillation Network GroupのHP (<http://gong.nso.edu/>)のアーカイブデータを使用

SOHO は地球より公転方向に、 $5.8 \times 10^5 \text{km}$ (=90 地球半径)ずれた位置にいた。そのため、同時刻でも、非常に大きい視差が観測できる。図 3 は、同時刻における SOHO とインドでの観測データである。非常に大きな視差がある事がわかる。太陽の見かけの大きさを基準にして求めた視差は  $\gamma=12.9'$  であった。この時の距離比  $r_M/r_E=0.55$  より、 $1 \text{ AU} = 1.8 \times 10^{11} \text{m}$  と求まった。より丁寧に測定すれば、より確からしい距離が測定できる。

(2) SOHO の Z 軸のずれ (地球公転面からのずれ) による視差

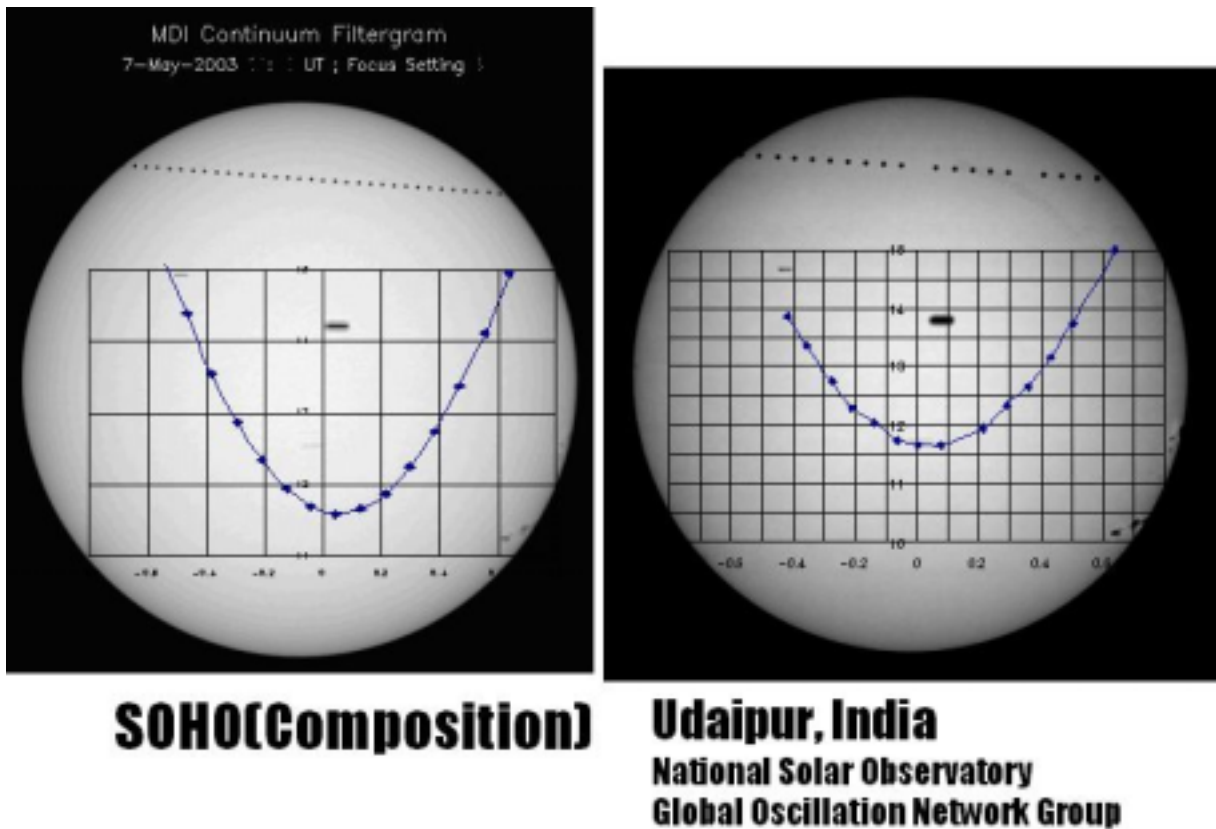


図 4 水星の太陽面経過時の SOHO とインドでの同時刻の観測画像

SOHO の HP のアーカイブデータ、および National Solar Observatory Global Oscillation Network Group の HP (<http://gong.nso.edu/>) のアーカイブデータを使用。画像合成は AstroArt 社のステライメージ 4 を使用し、その反転画像の水星の位置をマカリの位置測定機能で測定し、グラフ化した。

図 4 は水星の太陽面通過時の SOHO と GONG-Udaipur, India のアーカイブデータを、それぞれ合成し、軌跡をわかりやすくした図である。この合成図を反転し、水星の位置をマカリの位置測定の機能を使って測定した。太陽中心と水星の離角の変化のグラフを合成図に重ねた。離角の差は、SOHO の地球公転面からのずれによる視差による。この離角差は約  $1'$  である。このことより、 $1 \text{ AU}$  が約  $2 \times 10^{11} \text{m}$  であることが判る。ここで、精度が出ないのは、ベースラインが小さい事による。

### (3) 同一点通過時刻測定 (SOHO と地上)

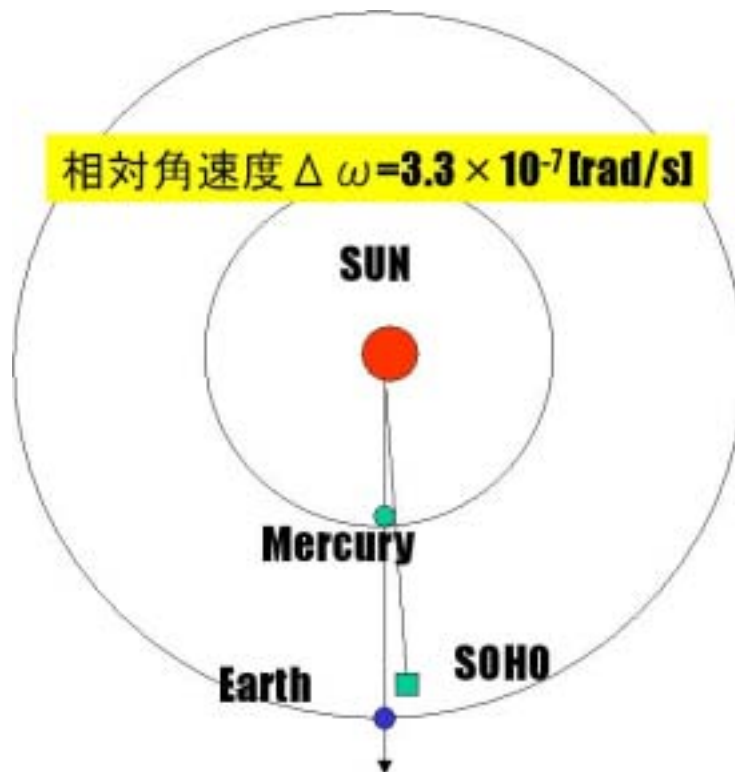


図 4 地球(SOHO)と水星の公転の様子と太陽面通過

太陽の同一場所(たとえば中央経度)の通過時刻差も非常に大きい時刻差が期待できる。実際に、それぞれの公開画像から、中央経過時刻差が 2 時間 40 分(約 9600 秒) で観測されている。

いま、地球と太陽を基準にした座標系で見れば、水星の太陽面通過は、水星の(相対公転)運動で起こると考えることができる。地球と SOHO の公転周期はほとんど同じなので、中央経過時刻差は、(地球-太陽-SOHO)の角度だけ、水星が(相対)公転運動する時間と考えることができる。すなわち、(地球-太陽-SOHO)=相対角速度  $\times$  時刻差 =  $\quad \times t$  である。これより、

$$1\text{AU} = Y / (\text{地球-太陽-SOHO}) = Y / (\quad \times t)$$

と求まる。この値は、 $1.5 \times 10^{11} \text{m}$  となる。この方法は、公転周期のみを使い、ケプラーの第 3 法則を使わなくても良いことから、小学校、中学校などの教材に使うことができると考える。

## 4 . 2004 年金星の太陽面通過

2004 年 6 月 8 日の金星の太陽面通過現象は、日本では 130 年ぶりの現象であった。残念な事に、日本は梅雨の時期であり、多くの地域が曇天で観測できなかった。この金星の太陽面通過は、世界的に注目を集め、多くの観測キャンペーンが行われた。これらのデータは、一部アーカイブとして公開されている。今回、National Solar Observatory の Global Oscillation Network Group(GONG)のデータから 1 AU を測定してみた。この GONG は日震学(helioseismology)による太陽の内部構造とダイナミクスを測定するため、世界 6 箇所の観測サイトで、ほぼ連続的な観測を行っている。今回の金星の太陽面通過時には、そのうち、スペイン(Learmonth)、インド(Udaipur)、オーストラリア(El Teide)の 3 箇所がほぼ同時刻の観測を行っている。このデータは、GONG の HP に公開されている。

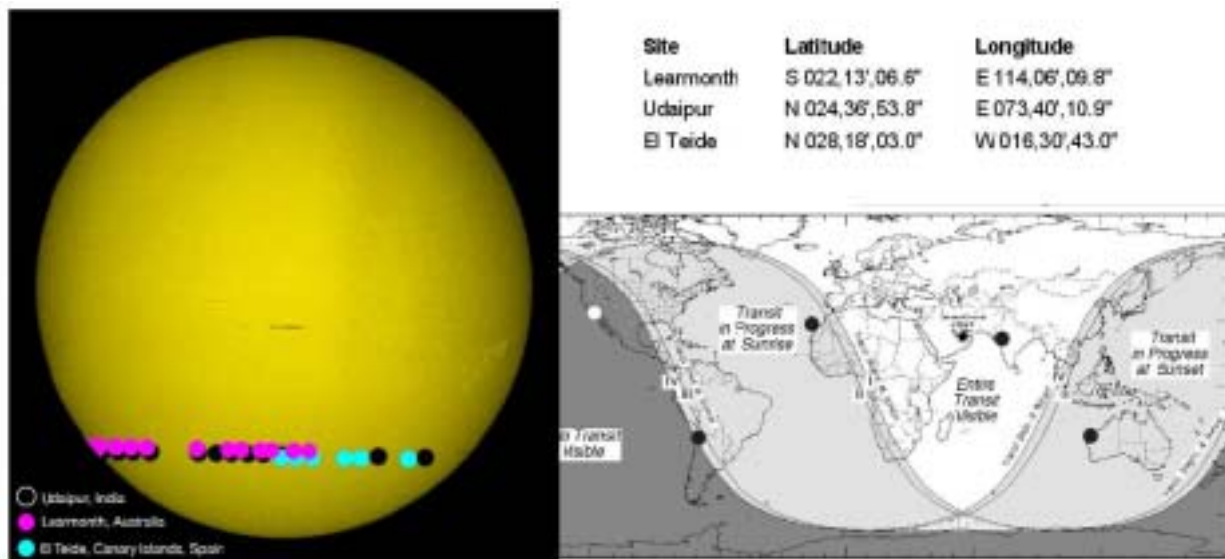


図5 GONGの観測サイトと金星の太陽面通過

National Solar Observatory Global Oscillation Network Group の HP (<http://gong.nso.edu/>) より。右は金星の太陽面通過の観測可能領域と3つの観測サイトの位置関係。ヨーロッパからアジアにかけての領域が第1接触から第4接触まで、全行程が観測可能である。日本は、第3接触前に日没する。左は、3つのサイトによる金星の太陽面通過の合成イメージ。

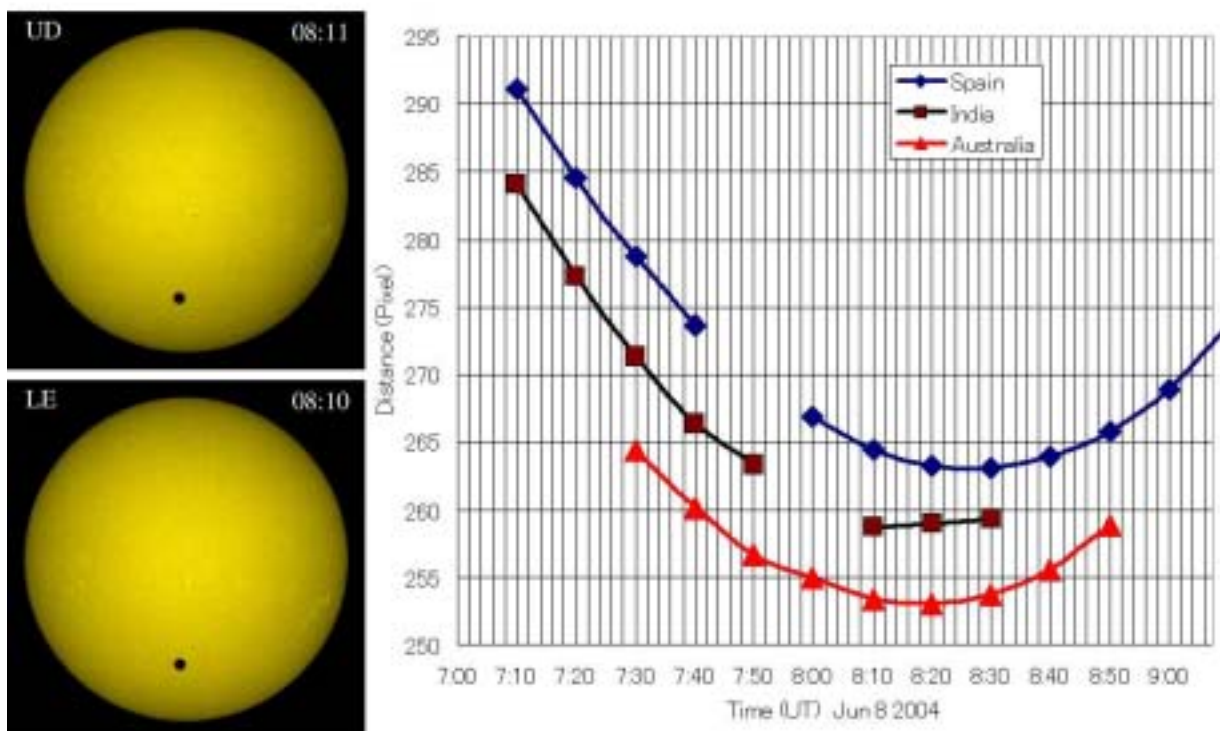


図6 GONGの観測サイトでの太陽面での金星の位置測定

GONGのアーカイブデータの一部を測定した結果。画面は(860×860)画素で、太陽直径は780画素数である。測定した金星の位置より、太陽中心からの距離(ピクセル単位)であらわしたのが右の図である。横軸は時刻(UT)である。

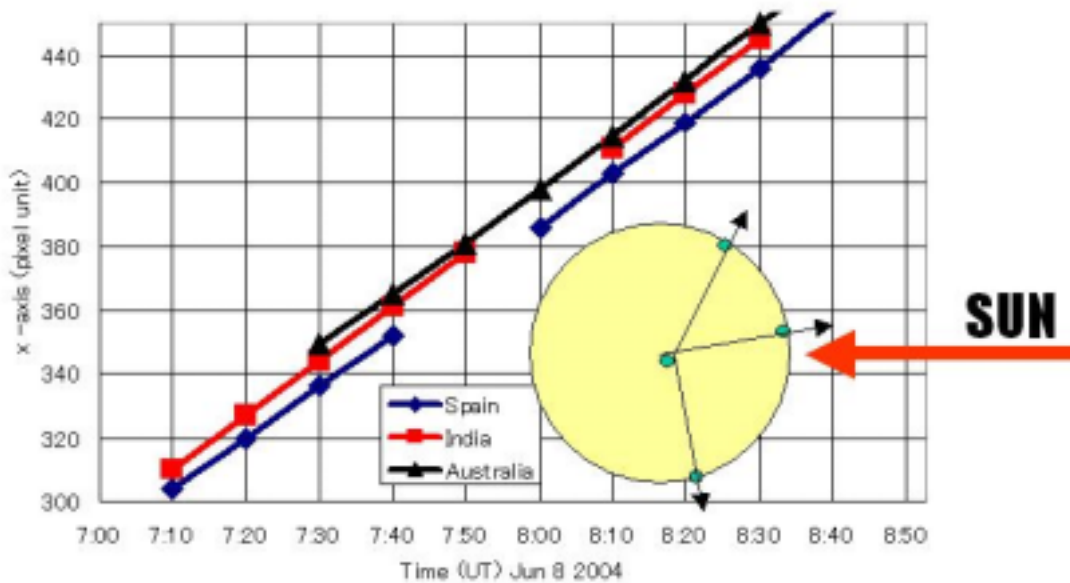


図7 GONGの観測サイト、同時刻での太陽面での金星の位置

GONG (<http://gong.nso.edu/>) のアーカイブデータの一部を、測定した結果。画面は(860×860)画素で、太陽直径は780画素数である。測定した金星の位置より、同一時刻でのWE方向のずれをピクセル単位で表した。横軸は時刻(UT)である。右の図は、同一時刻でのオーストラリア、インド、スペインと太陽の方向の位置関係を地球の公転面上に見た図である。

図5は金星の太陽面通過時のNational Solar ObservatoryのGlobal Oscillation Network Group(GONG)のスペイン(Learmonth)、インド(Udaipur)、オーストラリア(El Teide)の3箇所の合成イメージである。

図6は、マカリの位置測定の機能を使ってアーカイブデータから、金星の位置を測定し、太陽面の中心からの金星の離角をグラフ化したものである。縦軸は、太陽中心までの距離をピクセル単位で、横軸は時刻(UT)を表す。スペインとオーストラリアでの太陽中心からの距離は約10ピクセル差である。太陽の直径は、ピクセル単位で780ピクセルなので、 $\theta = 0.40' = 1.1 \times 10^{-4} [\text{rad}]$ と求まる。ここで、太陽の半径を $15' 47''$ とした。このときのベースライン長は、スペインとオーストラリア間の太陽方向に垂直な距離で、約0.8地球半径( $d = 0.8 R_e$ )である。いま、 $\theta = 0.722'$ より、ハレーの公式  $r_e = \left( \frac{d}{1 - \theta} \right) \left( \frac{d}{\theta} \right)$  に代入すれば、有効数字2桁で $1.2 \times 10^{11} \text{m}$ となった。実際の値より2割程度小さい値になった。

図7は、マカリの位置測定の機能を使って、各観測サイトでの金星の位置を測定し、太陽面の東西方向での金星の位置を描いたものである。縦軸東西方向の位置をピクセル単位で、横軸は時刻(UT)を表す。インドとスペインでは、約9ピクセル差である。よって、 $\theta = 0.36' = 1.06 \times 10^{-4} [\text{rad}]$ と求まる。このときのベースライン長は、インドとスペイン間の太陽方向に垂直な距離で、約1.0地球半径( $d = 1.0 R_e$ )である。いま、 $\theta = 0.722'$ より、ハレーの公式  $r_e = \left( \frac{d}{1 - \theta} \right) \left( \frac{d}{\theta} \right)$  に代入すれば、有効数字2桁で $1.5 \times 10^{11} \text{m}$ となった。有効数字2桁でほぼ期待される値が得られた。このように、地上でのデータアーカイブより、1AUの測定教材を作る事ができると期待される。

## 5. TRACE による金星の太陽面通過

2004年、金星の太陽面通過の時に、SOHOは、残念な事に、公転面から大きくずれていたために、太陽面通過を観測する事ができなかった。そのため、SOHOの画像解析によるわかりやすい教材は、残念ながら期待できない。しかし、太陽観測用の衛星、TRACEが大変興味深い観測を行っている。TRACEは太陽観測用の極軌道衛星である。



図8 TRACEによる金星の太陽面経過

図8は2004年、金星の太陽面経過の合成像である。金星の位置がうねっているのは、人工衛星が地球の極軌道を公転していることによる地球の直径分の視差による。この視差は、 $\approx 2.43 \times 10^{-4}$  rad, 距離比  $\approx 0.722$ , ベースライン  $d=1.40 \times 10^7$  mを代入すれば、 $1\text{AU}=1.49 \times 10^{11}$  mと求まる。有効数字3桁での測定が出来ている。

## 6. まとめと展望

1AUは、天体の“距離はしご”の第1段目として大変重要な値である。19世紀、2度の金星の太陽面経過は、国家プロジェクトと位置づけた観測が行なわれた。そのときの観測精度はたかだか3桁程度であった。今日では、レーダー観測やドップラートラッキングなどの計測技術によって、11桁の精度で求まっている。しかし、今回の金星の太陽面経過は、人工衛星時代になって初めて現象であり、これまでの地上観測より数桁も大きいベースラインの観測が可能である。それゆえ、どのくらいの精度が出るかたいへん興味深い。また、教育的には、金星の太陽面経過による1AUの測定はいまだに価値が高い。今回、2つの人工衛星からの公開画像データを使って、1AUの測定のアイディアを述べた。また、地上観測のアーカイブデータからも、比較的容易に1AUが測定できる。また、太陽面通過時の金星や水星の大きさから、1AUの測定結果を使用する事で、金星、水星のサイズ、太陽のサイズが決定できる。この授業の発展として、太陽のサイズを決定する事で、太陽中心の「太陽系」観を養うとともに、地球、金星、火星のサイズ、距離を比較する事で、地球型惑星の「比較惑星学」へ展開する事も出来るだろ。

最後に、本研究会では、この1AU教材以外に、距離測定として、金星や火星の形状変化を使ったAU単位での距離測定、および、月までの距離測定についてのアイディアも述べた。これらは、いずれ、別の機会で発表する。

### 参考文献

- (1) SOHO-HP <http://soho.nascom.nasa.gov/>
- (2) TRACE-HP <http://vestige.lmsal.com/TRACE/>
- (3) National Solar Observatory Global Oscillation Network Group HP <http://gong.nso.edu/>
- (4) 大西浩次 日本天文学会 2004年秋季年会 Y04b  
水星と金星の太陽面通過における人工衛星からの視差と1天文単位の測定