

太陽系のスケールを測る

水星の太陽面通過による「ケプラーの第2法則」の教材開発

大西浩次（長野工業高等専門学校）

Determination the scale of Solar System

Mercury Transit and 2nd Law of Kepler

Kouji Ohnishi (Nagano National College of Technology)

1. はじめに

2006年11月9日の水星の太陽面通過は、国内各地で観測された。この水星の太陽面通過の際に、地上と人工衛星からの太陽視差を使って1天文単位を測定する試みを提案したが、太陽面通過時の太陽と水星の距離を与えないと非常に大きな誤差が生じてしまった。その理由は、水星の離心率が0.2と大きいこと、その結果として、水星の太陽面通過の時、5月は水星の近日点、11月は水星の遠日点に近く、水星の長半径より20-30%も変動しているためである（図1参照）。逆に、1AUを与えると、太陽視差から水星までの距離が測定でき、かつ、太陽面上の移動速度より、水星の実速度がわかる。1AU測定教材は、金星の太陽面通過で示すことができる（2005年集録）ので、本発表では、2003年5月7日と2006年11月9日の水星の太陽面通過現象を、地上、および、太陽観測衛星から測定したデータを基に、1AUの距離を与えたとき水星までの距離を決定できること、および、実速度の計測からケプラーの第2法則を確認する教材を示すことである。あわせて、1AU教材の流れの中で、1AUの観測の歴史や意義をはっきりさせて、教材の一連の流れを完成させたいと考えた。

この集録原稿には、おもに、水星の太陽面通過を使ったケプラーの第2法則を確認する教材の流れについて記述することに限定することにする。

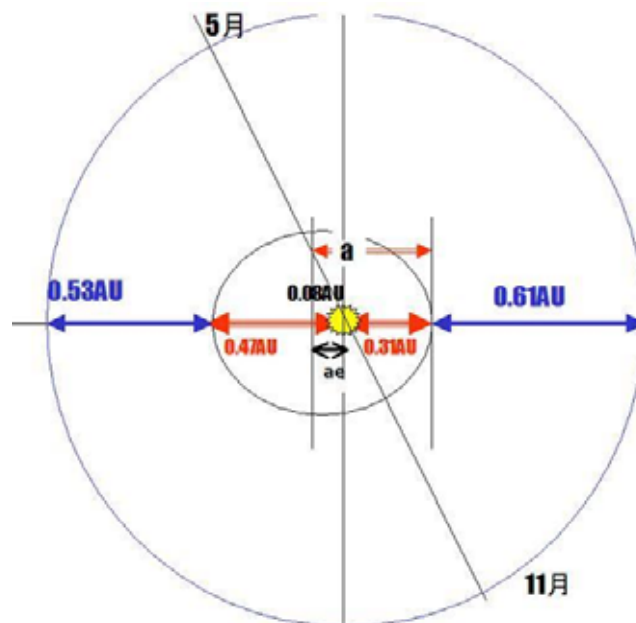


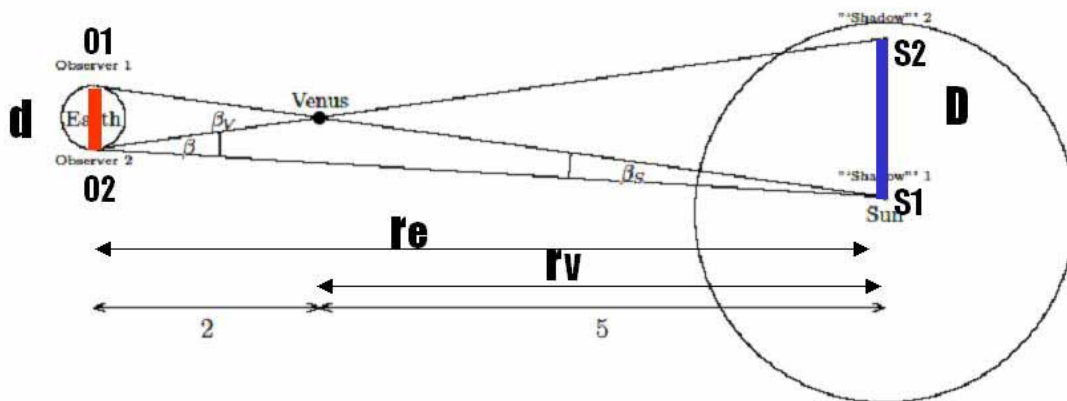
図1 水星の軌道

a(長半径)=0.38710AU, T(周期)=115.88days, e(離心率)=0.20563, i(軌道傾斜角)=7.0051度. 太陽面通過が起きる5月8日頃(降交点)、11月10日頃(昇交点)のころの水星の距離は長半径aよりずいぶん異なる。

2. Halley のアイデア

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。

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2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()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($r_E - r_V$)と太陽金星間の距離(r_V)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($1/\alpha$)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()を測れば、1AU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2 Halley のアイデア

3 . SOHO による水星の太陽面経過による水星の距離測定

2003 年 5 月 7 日、および 2006 年 11 月 9 日の水星の太陽面通過における 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、2003 年 5 月 7 日の SOHO の位置は、図 3 の GSE 座標で $(X, Y, Z) = (1.54 \times 10^6 \text{ km}, -5.7 \times 10^5 \text{ km}, -8.0 \times 10^4 \text{ km})$, 2006 年 11 月 9 日は、 $(X, Y, Z) = (1.28 \times 10^6 \text{ km}, -5.3 \times 10^5 \text{ km}, 5.1 \times 10^4 \text{ km})$ である。ともに、SOHO は地球より公転方向に、約 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 4 は、2003 年、水星の太陽面通過の同時刻にける SOHO とインドでの観測データ、図 5 は 2006 年、水星の太陽面通過の同時刻における SOHO と長野の観測データを示す。2003 年の太陽の見かけの大きさを基準にして求めた視差は $\theta_v = 12.9$ であった。 $1 \text{ AU} = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ を使うと、水星までの距離が 4.5AU と求まる。同様に 2006 年は 3.1AU と求まった。

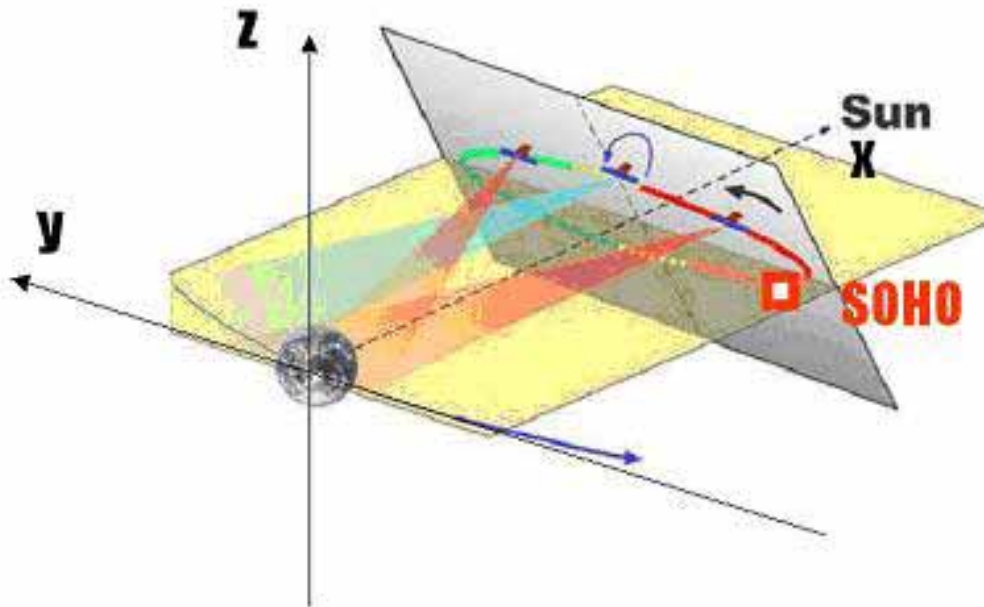


図 3 太陽観測衛星 SOHO の位置

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 3 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。2003 年 5 月 7 日、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。

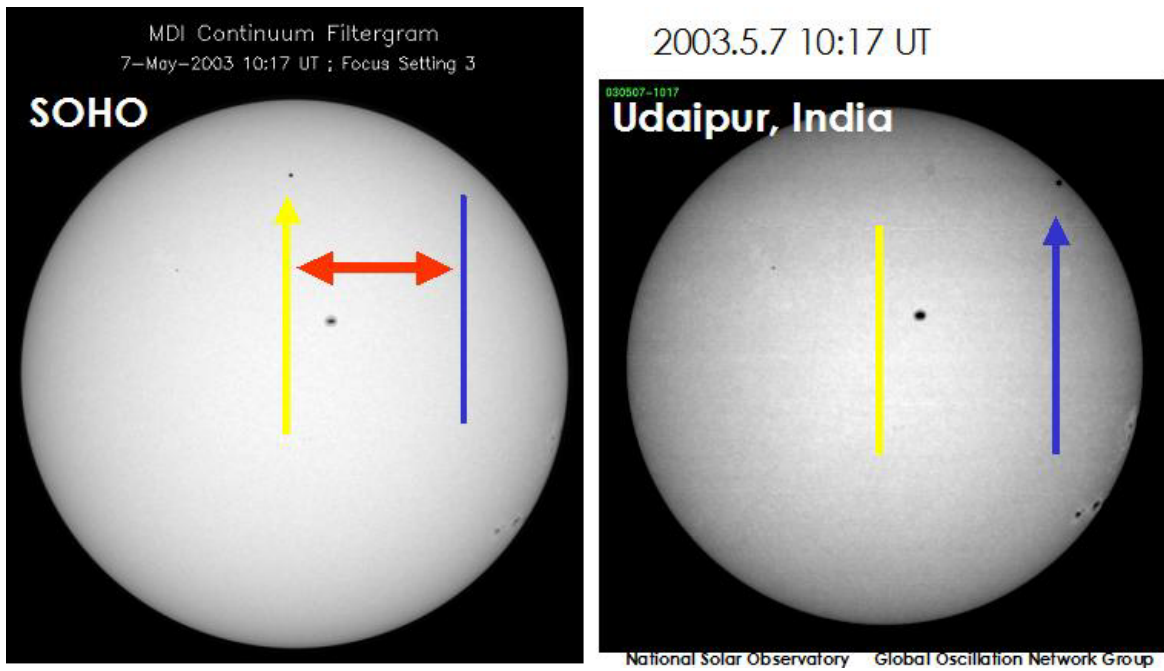


図4 2003年5月7日、水星の太陽面経過のSOHOとインドでの同時刻の観測画像
 SOHOのHP、National Solar Observatory Global Oscillation Network GroupのHP
 (<http://gong.nso.edu/>) のアーカイブデータを使用

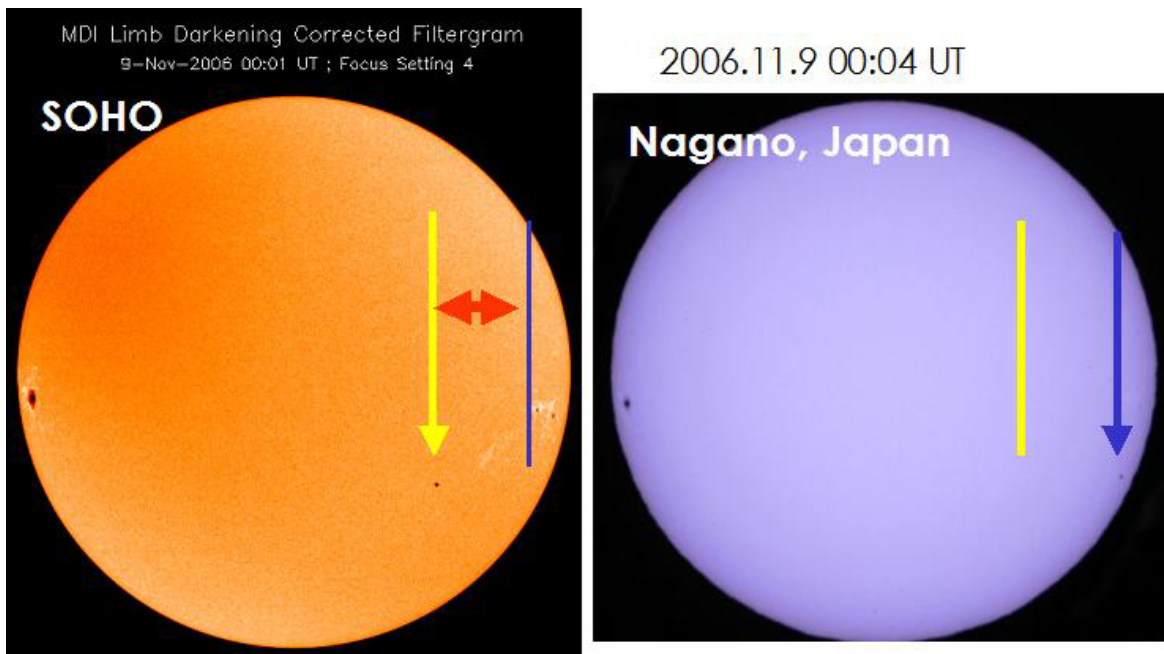
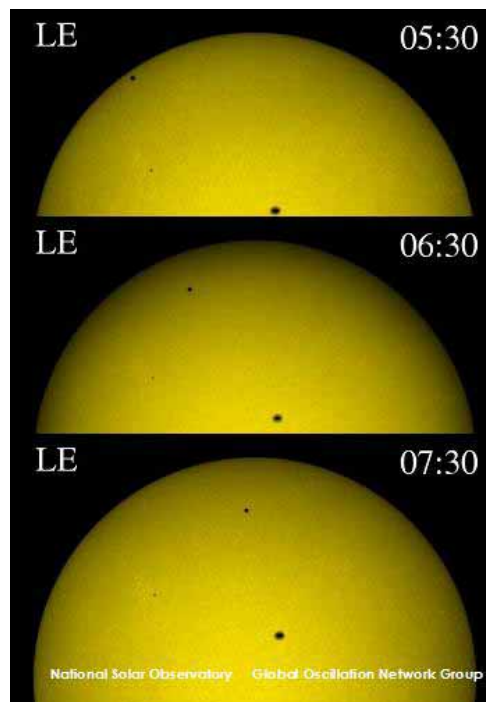


図5 2006年11月9日、水星の太陽面経過のSOHOと長野での同時刻の観測画像
 SOHOのHP、長野は、長野高専天文部が撮影のデータを使用 (D=76mm F=8 Canon EOS
 D5)

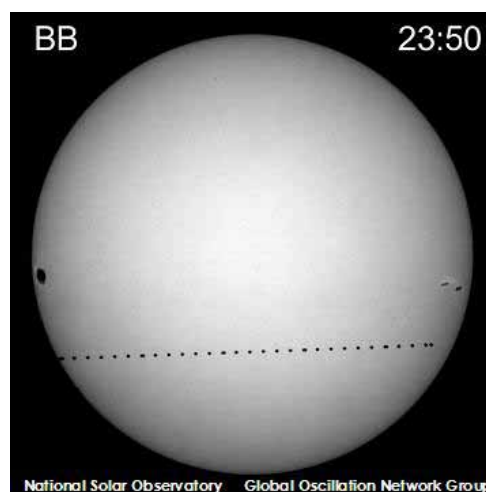
4. 水星の太陽面通過とケプラーの第2法則

ケプラーは、1609年「新天文学」を著し、惑星の運動に関するケプラーの第1法則、第2法則を示した。第1法則は、惑星の軌道が楕円であり、その1つの焦点に太陽があること、第2法則は面積速度一定の法則と呼ばれ、惑星の運動は(太陽からの距離)×(軌道上をすすむ距離)=一定という関係を満たしながら進んでいるとするものである。今日では、この第2法則は角運動量保存則を著していることが知られている。

さて、水星の太陽面通過時に、太陽視差により水星までの距離を測ると共に、太陽に対する水星の運動より、水星の実速度を求める事が出来る。はじめに、水星の太陽面上での見かけの角速度を求めてみよう。



2003年5月7日、水星の太陽面通過の様子。



2006年11月9日、水星の太陽面通過の様子

図6 水星の太陽面経過における水星移動の様子

	太陽からの距離 AU	1時間あたりの角速度 ω '/hour
2003年5月7日	0.45 AU	3.85'/h
2006年11月9日	0.31AU	5.57'/h

表 1

測定結果を表 1 にまとめた。ただし、この角速度が地球から見た水星の見かけの角速度であることに注意すれば、水星の実速度を求める事が出来る。

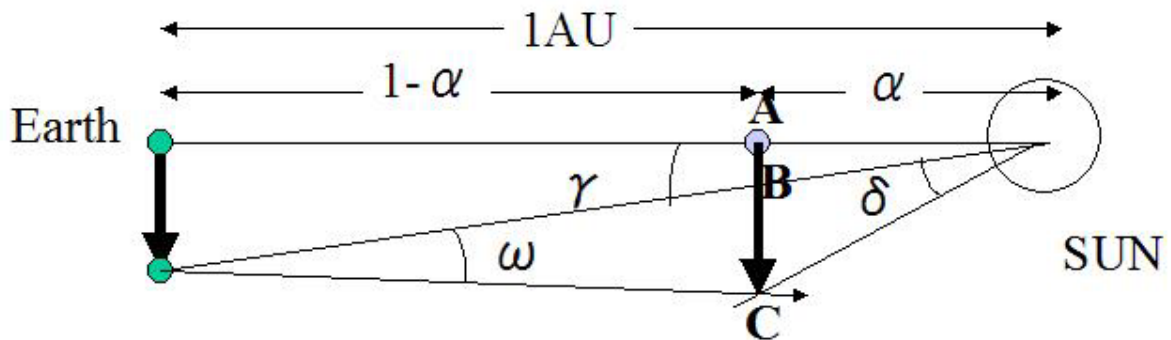


図 7a

図7aのように、地球も公転しているので、水星の見かけの角速度は1時間あたり ω である。一方、地球の公転による角速度 ω_e は $\omega_e = (30\text{km/s} \times 3600\text{s}) / (1.5 \times 10^{11} \times 5.0 \times 10^{-6}) = 1.44 \times 10^2 \text{''/h} = 2.4 \text{'/h}$ である。一方、 ω 、 γ 、 δ と実速度の関係を求めてみる。

図7bのように、BCの距離は $BC = (1 - \alpha) \times 1\text{AU} = \omega_e \times 1\text{AU}$ より、角度は $\omega = \{ (1 - \alpha) / \gamma \}$ が成立する。

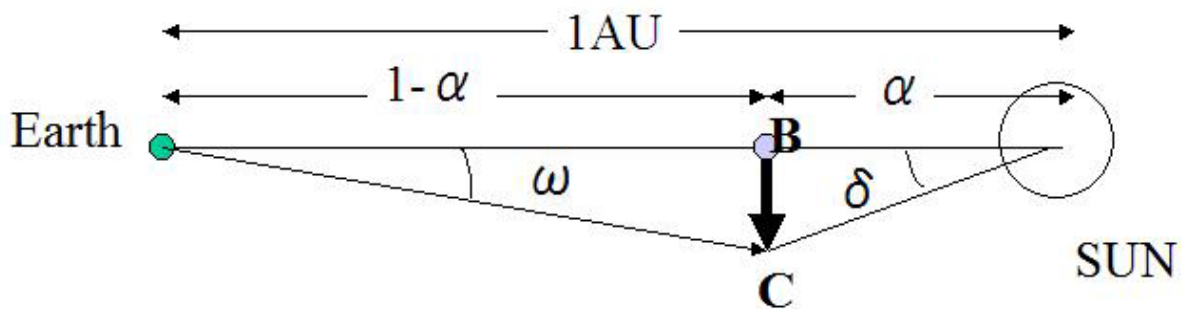


図7b

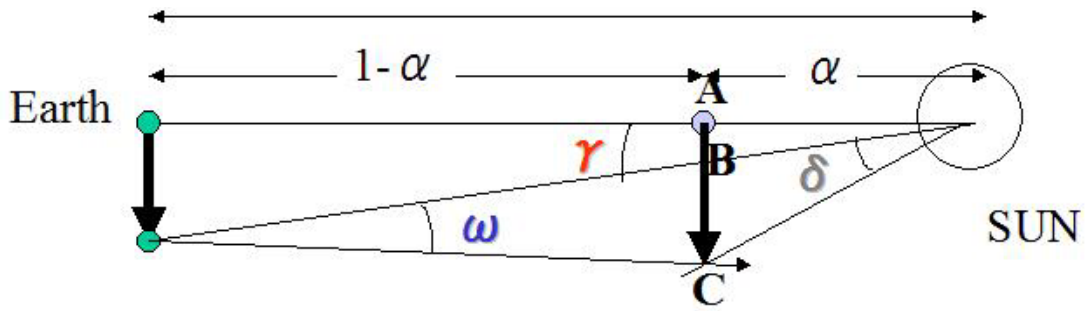


図7c

すなわち、1時間あたりの水星の実移動量ABCは

$$ABC = (\quad + \quad) \times 1AU = [(1 - \quad) + \quad] \times 1AU$$

である。これより、表1のデータを入れて、実速度を計算すると2003年の時は、38.8km/s, 2006年の時は、55.7km/sとなる。

	太陽からの距離	見かけの角速度 ω	実速度	距離*速度
2003年5月7日	0.45 AU	3.85'/h	38.8km/s	17.4
2006年11月9日	0.31AU	5.57'/h	55.7km/s	17.3

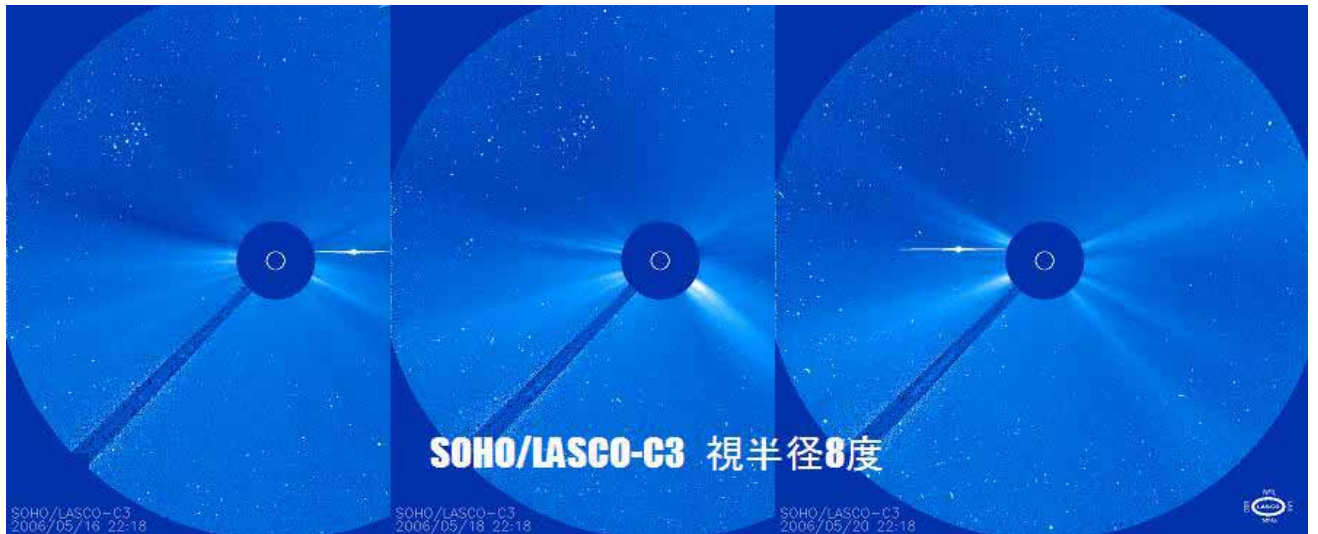
表2

以上より（太陽からの距離）×（実速度）=一定である事が確かめられた。

6. まとめ

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、2004年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。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。

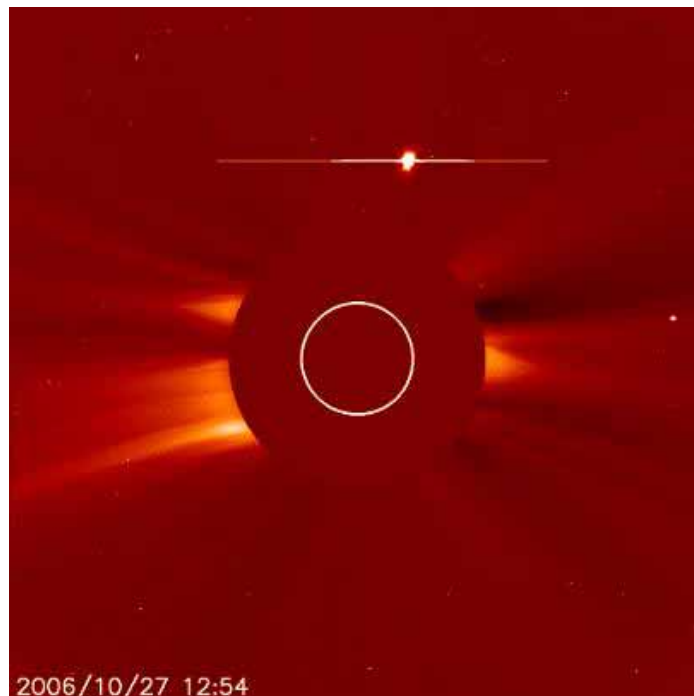
Appendix 1 公転教材



A1.2006年5月16日(左)、18日(中央)、20日(右)の太陽とM45(すばる)の位置関係

地球の公転を示す簡単な教材として、SOHOの太陽コロナ望遠鏡LASCO-C3を使うことを提案する。上の図のように星座(星団)など特徴的な星の並びを動いていく様子を測定し、1日の太陽の動きを確認する。短時間の演習で1日約1度、年間360度回ることを確認する事が出来る。

Appendix 2 惑星と地球の公転を確認する教材



A2.2006年10月27日、火星と太陽の位置関係

2006年10月27日SOHOの太陽コロナ望遠鏡LASCO-C2の画像、火星が太陽背景を動いていく様子がわかる。このような太陽に対する通過の様子を測ることで、地球の黄道面と惑星の黄道面の傾きを決定する事が出来る。

Appendix 3 みんなの科学としての教材 = パブリック科学教材

The necessity of “Public material on Science”

Kouji Ohnishi

研究会において、「Paofits教材が、学生の教育には高尚過ぎないか」という質問に対しての私の答えたこと。

「最近、新教育課程の児童の約半分が「太陽の回りを地球が回っている」のか「地球の回りを太陽が回っている」のかを知らない事が指摘されている(懸 2004)。この発表の後、この「天動説か地動説か」という問題は、「理科離れ」、「学力低下」、「実験偏重カリキュラム」などいろんな文脈で言われている。しかし、ここで1つ確認しておきたい事がある。それは、「天動説か地動説か」の知識の有無だけを問題にするのではなく、その意味を科学的に理解をしているか、さらに、その意味を実感として会得できているかという点に注目すべきであろう。現代の科学技術が非常に高度になっていて、身の回りの物でさえ、ブラックボックス的になっている。そのため、使える事(知っている事)が分かっている事と勘違いされている風潮にある。あるいは、分かろうと思ってもある程度の高度な周辺知識を要求され、挫折してしまう。この事が科学離れの1つの原因で無いかと考える。科学手法の効用は、物事を盲目的に信じるのではなく、まずは疑い、実証し、理解するという一連の考え方を身につけることだ。ところが、実際の実証・理解となると高度な学習が必要であったりして、すべての人が一律に修得するには問題がある。

しかし、もし、なぜ「地動説」が正しいと考えられているのか、その根拠は?と感じた人が、自分で実証できる(追体験できる)実習教材が必要では無いだろうか?また、このような実習教材がある事、そしてそれが誰にでもOPENな形で利用可能になっている事、そして、科学のすべての分野に整備されていること、このような公共に開かれた科学的考えを確認する手段がある事が、科学への信頼性の回復に必要なのでは無いだろうか。いまこと、いろんな科学知識の背景にある事象を、だれでも、必要な時に実証(追体験)できる教材が必要であると考え。このような教材を、ここでは「パブリック科学教材」と呼ぶ事にしよう。ここでは、「パブリック科学教材」のひとつの手本としてPaofit教材があると考えている。」

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