〈第26回　山崎賞〉

10　ガリレオ衛星の公転運動の研究

１．研究の動機

2009年は世界天文年で、これは今から400年前にガリレオ・ガリレイが望遠鏡を使って人類史上初めて天体を観測したことにちなむものです。ガリレオの天体観測は多岐にわたり、「星界の報告」という著書として残されています。中でも当時の天文学に大きな進歩をもたらしたのが木星の衛星の発見です。私たちは、夏休みの合宿で、ガリレオ衛星を観測し、その運動に興味を持ちました。特に今年は、木星の軌道を真横から見る位置関係にあることを知りました。このことは、ガリレオ衛星の軌道を詳しく調べることに有利な条件であり、私たちはガリレオの観測の追体験をすると共に、衛星の軌道を解析してみることにしました。その最終目標として次の二つを設定しました。

⑴　衛星の公転軌道の大きさと公転周期を求め、ケプラーの第三法則の成立を確認する。

⑵　ケプラーの法則より木星の質量を求める。

２．研究の手順

⑴　ガリレオ衛星の撮影

ガリレオ衛星の正確な位置を継続的に測定するために、デジタルカメラでの写真撮影を行うことにしました。利用した機材と撮影状況は以下の通りです。

ア　撮影機材

カメラ：ＮＩＫＯＮ　クールピクスE995によるコリメート方式（すべてに共通）

機材A　望遠鏡：ビクセン製屈折望遠鏡　A80MWT(口径80㎜、焦点距離910㎜）

合成焦点距離：1410.5㎜（最大ズーム、31mm時）

機材B　望遠鏡：TAKAHASHI製　FS128屈折望遠鏡（口径128㎜、焦点距離1040㎜）

合成焦点距離：1151㎜（最大ズーム、31mm時）

機材C　望遠鏡：TAKAHASHI製　MT160反射望遠鏡（口径160㎜、焦点距離1000㎜）

合成焦点距離：1107㎜（最大ズーム、31mm時）

イ　撮影方法

学校内での観測は、主に木星が見え始める薄明後半時刻（午後５時半頃）から午後７時頃までで、30分から１時間程度の間隔をおき、複数回撮影をしました。それ以降の時間帯や休日には部員の自宅にて同じカメラを利用して撮影しました。

ウ　撮影期間と取得画像数

全期間で25日間にわたり撮影を行い、撮影した写真は合計で800枚以上になりますが、最終的に研究に使用した写真は10月３日から11月21日までの期間の53枚になりました。

⑵　撮影画像の解析

ア　画像の取り込み

このようにして撮影した画像はJPEG形式で処理され、パソコンに取り込まれました。

イ　画像上の位置測定

まずは、各画像上の４つの衛星の位置を正確に測定する必要があります。この目的のために、フリーウエアで「ピクセル計測」というものを見つけ、利用しました。衛星の座標測定の方法と

して以下のような手順をとることにしました。

① 画像の表示（フル画面）

② PC付属のソフト「ペイント」で、木星中心と写っているすべての衛星が一線上に乗るように直線を描く。これには衛星の軌道面の傾きが無視できることを前提としています。

③ 「ピクセル計測」で、直線上での木星像の左端と右端の座標値（X，Y）を読みとる。

④ 同じ画面上で各衛星の中心座標値（X、Y）を読みとり記録する。なお、この作業では、写っている衛星の特定は天文ソフト、ステラナビゲータと対応させて行いました。

こうして得たピクセル値のうち、木星像の左端と右端の座標値の平均値を木星中心とし、更に木星中心の座標値と各衛星の座標値の差から各衛星の木星中心距離を計算しました。

ウ 位置データの角距離への換算

ここまでの作業で得た位置座標は写真上の座標値（ピクセル単位）に過ぎません。そこで、画像上の距離を天球上の角距離（秒単位）に換算するために以下のような作業をしました。

① 角距離決定の基準画像としてプレアデス星団を撮影しました。使用機材は前述の機材Bの望遠鏡です。画像上で、次の②に示した二つの基準恒星の座標値を読み取り、その距離をピクセル単位で815ピクセルと求めました。

② 基準星として選んだのは次の二つの恒星です。その天球座標をステラナビゲータの位置データより以下のように得ました。

恒星１　アルキオーネ　α＝3h47m29.07s　δ＝＋24°06′18.5″

恒星２　HIP17704　α＝3h47m29.45s　δ＝＋24°17′18.0″

これより二星間の角距離を求め、659.5″という角距離を得ました。

③ 上記の結果より写真上の１ピクセルが天球上の角距離で何秒に相当するかを決定しました。この値が換算値、1.2354″／Pixelです。

エ 角距離データの処理

木星－地球間の距離は撮影期間中に約0.72天文単位と、大きく変化していますので、得られた角距離はそのままでは実際の距離値にはなりません。更に、画像によってカメラのズーム焦点距離が異なり（撮影時の不手際によります）、使用望遠鏡によっても拡大率が異なります。そこで、角距離データに次のような手順で補正を施し、最終的に衛星の木星中心からの距離を木星直径単位で表すことにしました。

① 機材による補正

撮影に使用した望遠鏡は前述の三種類です。それぞれの合成焦点距離によって画像の大きさが異なるため、基準として機材Bの合成焦点距離約1151㎜に合わせる操作をしました。

② ズーム焦点距離による補正

撮影時のズームレンズの焦点距離を一定にできなかったため、最大値31mmに合わせるために、(31/焦点距離）の値を補正値として乗じました。

③ ピクセル単位から天球上の角度（秒単位）に換算するために換算値（1.2354″／Pixel）を乗じました。

④ 木星－地球間の距離変化を補正するために、木星の視直径（単位は角度の″）を衛星の実際の距離基準としました。それぞれの撮影時に対応する木星の視直径の値はステラナビゲータより取得し、③で求めた各衛星の角距離を木星の視直径で除しました。

３．取得データの解析

このようにして最終的に木星中心に対する衛星位置が求められました。（木星直径単位）ここでは距離データ値を時間軸でグラフ化するために撮影日時を日単位に換算してあります。また、測定に使用した画像が10月３日以降であることから、10月0.0日（＝９月30日０時０分）を基準とした通算日数表示

にしてあります。また、衛星が木星の東側に位置する場合を（+）、西側に位置する場合を（−）で表してあります。

このデータを元にして次の作業を行いました。

⑴　公転軌道の決定

次の図１から図４は期間中の木星中心に対する各衛星の位置データをプロットしたものです。縦軸が衛星の距離（木星直径単位）、横軸が時刻（日単位）です。

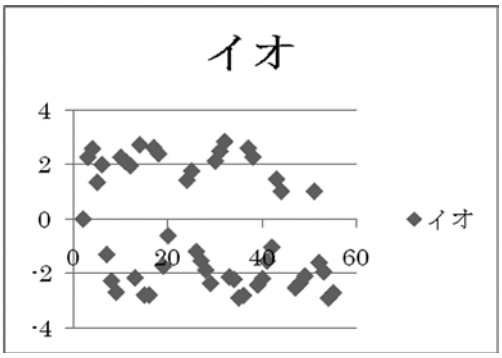

図１

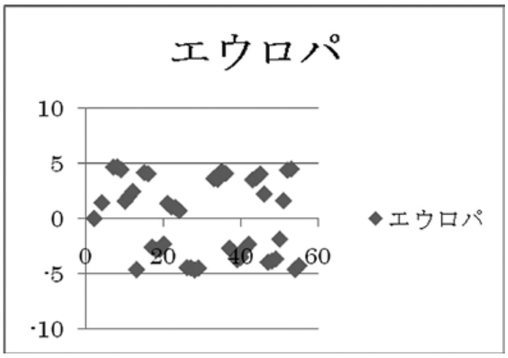

図２

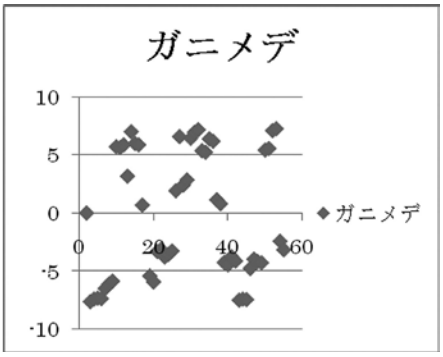

図３

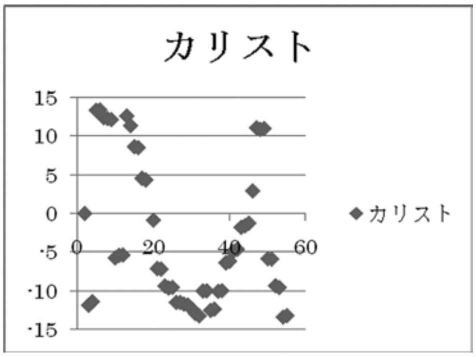

図４

図で明らかなように、衛星は一定の振幅の中で変化を繰り返しています。その中で、最も大きく離れた位置が各衛星の公転軌道半径と考えられます。データから東側および西側に離れたそれぞれの最大値を探し出し、これを平均して公転軌道半径としました。この結果を天文年鑑から得た数値（資料値）と共に示したのが次の表１です。４つの衛星について求めた値が最大誤差2.4％以内に収まっていることが分かります。

表１　中心距離の最大値（木星直径単位）

	＋(東)側	ー(西)側	平均値	資料値	誤差
イオ	2.850	2.905	2.878	2.950	ー2.4%
エウロパ	4.655	4.670	4.662	4.694	ー0.7%
ガニメデ	7.248	7.622	7.435	7.486	ー0.7%
カリスト	13.403	13.408	13.406	13.167	+1.8%

⑵　公転周期の決定

次に公転周期の決定にとりかかりました。ガリレオ衛星の公転軌道は実質的に円軌道と見なすことができ、これを真横から見ていることになるので、木星を中心とした正弦曲線となることが予想されます。そこで、その周期を求めることを試みましたが前掲の図１～図４でわかるようにデータの欠落日が多く、連続性が不明瞭です。そこでデータが連続している10月27日から11月19日までの13日間に限定してグラフを作成しました。これが次の図５～図８です。

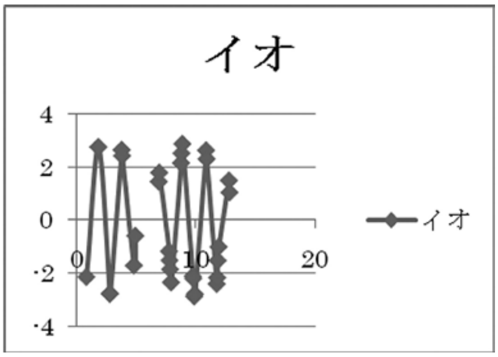

図５

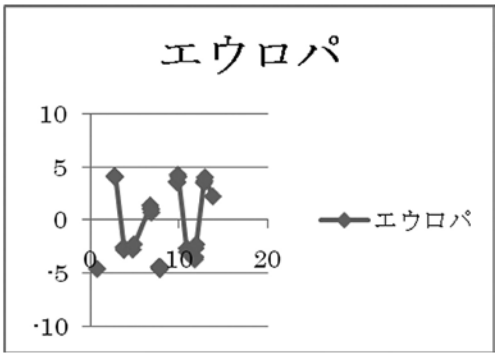

図６

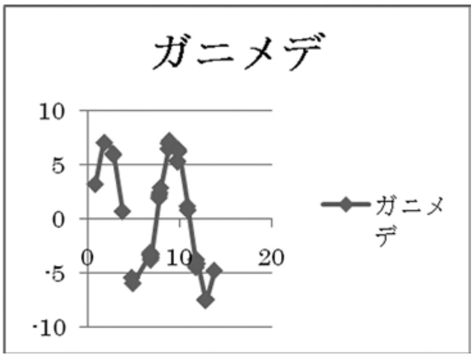

図７

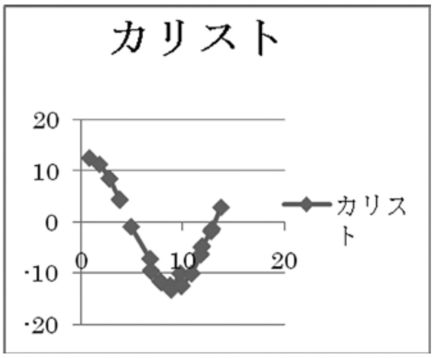

図８

不完全ながら、周期性を読みとれる図が得られました。しかし、衛星の公転周期に対する観測数が衛星ごとに大きく異なり、このグラフだけでは周期を確定しにくいことがわかります。より正確な周期を求めるにはできるだけ長期間のデータを使うことが有効です。そこで、それぞれの衛星について以下のように距離データを拾い出して公転周期を求めました。

ア　イオについて

イオは木星に最も近い軌道を描いているため、公転周期が短く、図５の中でも明瞭な振幅を読み取ることができ、約２日弱程度の周期が予想されます。そこで、全期間のデータのうち、マイナス側の最大値を示している通算日付36.844日（－2.900）と52.733日（－2.905）の間に９回の公転があったと考え、これより1.766日の公転周期を算出しました。

イ　エウロパについて

図６の13日間におよそ４回の公転が推定されることから、3.5日程度の公転周期が導かれます。しかし、データの連続性が不十分です。そこで全期間のデータのうち、プラス側の最大値を示している通算日付11.738日（4.655）と52.760日（4.487）の間に12回の公転があったと考え、これより3.546日の公転周期を算出しました。

ウ　ガニメデについて

図７の13日間におよそ２回の公転が推定されることから、７日程度の公転周期が導かれます。そこで全期間のデータのうち､マイナス側の最大値を示している通算日付3.874日（－7.622）と39.774日（－7.492）の間に５回の公転があったと考え、これより7.180日の公転周期を算出しました。

エ　カリストについて

図８では比較的なめらかなカーブが得られ、13日間におよそ１回弱の公転が推定されます。ここでは特に、長期のデータによる決定が有効と考え、全期間のデータのうち、プラス側の最大値の通算日付10.924日（13.403）とマイナス側の最大値の52.733日（－13.407）の間に2.5回の公転があったと考え、これより16.724日の公転周期を算出しました。

ここまでの作業で得られたデータと、天文年鑑による資料値を次の表２にまとめました。

表２				
	軌道半径（a木星直径）		公転周期（P日）	
	観測値	資料値	観測値	資料値
イオ	2.878	2.95	1.766	1.769
エウロパ	4.662	4.694	3.546	3.551
ガニメデ	7.435	7.486	7.18	7.155
カリスト	13.41	13.167	16.724	16.689

⑶　ケプラーの第三法則の適用

こうして求められた公転軌道半径と公転周期の間にはケプラーの第三法則が成立していることを確認するために、公転周期Pの自乗と軌道半径ａの三乗を対数グラフにプロットしました。その結果が次の図９です。

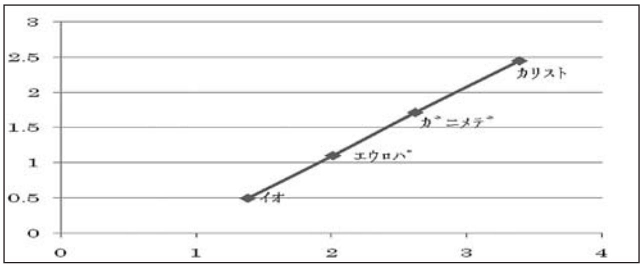

図９

データからきれいな直線関係が得られました。これより、４つのガリレオ衛星にもケプラーの第三法則が成立していることが確認されました。

⑷　木星質量の推定

ケプラーの第三法則は一般に、式 $a^3／P^2＝K$　と表されます。ここで定数Kは、母天体の質量によって決まり、ａを天文単位、Ｐを年単位で計算した値は、母天体の質量を太陽質量単位で表した数値となります。そこで、得た公転軌道半径と公転周期とから木星の質量計算を試みました。このため、公転軌道半径を天文単位に、公転周期を年単位に換算し計算しました。

表３　各衛星データから求められた木星質量（太陽質量単位）

イオ	エウロパ	ガニメデ	カリスト	平　均
0.891×10^{-3}	0.939×10^{-3}	0.929×10^{-3}	1.003×10^{-3}	0.941×10^{-3}

求めた数値は、天文年鑑の資料値0.9546×10^{-3}太陽質量とかなり良く一致している。

４．まとめと反省

最終的に出てきた結果は思ったよりも良いもので、研究を通してケプラーの法則の理解が深まり、研究の進め方についても良い実践の機会となり、学ぶことが非常に多くありました。

なお、今回の反省点としては次の点が上げられます。

⑴　観測期間と時間が限られたため、一晩での連続した画像の取得が十分でなかった。データの連続性の面で観測をもっと早い時期から始めるべきだった。

⑵　表計算等のソフトの使い方の知識不足で、作業に無駄な時間が多くかかってしまった。

今回の経験を生かし、もう少し精密なデータを得る方法を考えていきたいと思います。

５．参考文献および参照または利用したソフトウエア

天文年鑑2009　誠文堂新光社　2008

ステラナビゲータVer.8　アストロアーツ　2008

Excel　2007　マイクロソフト社

ピクセル計測　フリーウエア