

# デジカメでとらえるガリレオ衛星 —木星の質量を測ってみよう—

元滋賀県立長浜北星高等学校 山村 秀人

## 1. はじめに

この実習教材は「あなたもできるデジカメ天文学」に掲載の「ガリレオ衛星の動きと木星の質量」のための画像データとして、2015年4月の半月間にガリレオ衛星の動きをデジカメで捕らえた画像を使って、ガリレオ衛星の動きと木星の質量を求める実習教材にまとめた。2016年3月のWS（ワークショップ）では主にガリレオ衛星の動きを捕らえる実習体験を行った。また、2016年10月の地学教育学会のWSでは、木星の質量を求めることを主眼にした実習体験を行った。この2回の実習体験を通して、実習教材として整備を進めることができ、参加者の実習体験を踏まえた、貴重な意見や感想をいただくので、これを基にさらにこの教材の改良を進めたいと考えている。

## 2. デジカメによるガリレオ衛星の撮影

実習に入る前に「デジカメ天文学」には詳しく記述できなかった、ガリレオ衛星の撮影に関するノウハウを少しまとめて紹介した。

### (1)撮影方法

- ・1～2時間おきに数枚ずつ撮影する。（1日に1～数回）
- ・位置測定にのみ使うので、JPG画像記録でデジカメによりガリレオ衛星の撮影をする。

私の観測の場合の撮影データは以下のとおり。

Canon EOS50D (APS-Cサイズ) +200mm望遠 (ズーム) <35mm版:320mm相当>

ISO:2000 露出:1/15～1/4s

- ・画像上で木星本体と衛星の距離が数10ピクセルあれば十分。

### (2)撮影方法

- ・ズームレンズは固定焦点ではないので、ピントがずれやすいので注意する。
- ・オートフォーカスも利用できるが、点光源で微妙に外れていることがある。
- ・モニター画像の拡大機能を十分に生かす。
- ・PC制御が可能な場合は、大型モニターでさらに拡大してピント確認をする。

### (3)露出

- ・ガリレオ衛星（5～6等）が写るように決める。
- ・木星本体は-2等で露出オーバーになる。
- ・できるだけ高感度で速いシャッターをきる。

### (4)カメラブレ対策

- ・カメラを三脚に固定する。
- ・電子リモートスイッチの利用。
- ・セルフタイマーの利用（数秒の待機時間）。

- ・連写機能があれば数枚連写して、ブレていない画像を選ぶ。

### 3. 実習の概要

#### (1) 50枚の画像を1人2枚程度で分担測定

2015年4月15日から31日の間の悪天候の2夜を除く、15夜に1～2時間間隔で撮影した50枚の画像を、実習体験参加者全員で分担して測定するために、一人2枚程度担当するファイルNo.を決定した。

#### (2) マカリによるガリレオ衛星の位置測定と結果集約

マカリの位置測定機能を使い、ガリレオ衛星と木星本体の位置測定をした。それぞれの画像上の位置を示すx y座標を記録して、その測定結果をメモし、測定結果集約係に提出してもらった。全ての測定結果をExcel計算表の(SatelPos-20160321WS.csv)

#### (2) 位置測定機能で測定 → XY座標をメモして集約係へ



木星本体とガリレオ衛星のXY座標

- ・測定方法は重心、半自動
- ・木星と衛星それぞれのサイズ(ピクセル)に合わせる
- ・木星やほかの衛星と接近しているときは半径を小さく

Frame No	Ex. Time	Date	木星位置		イオ位置		エウロパ位置		ガニメデ位置		カリスト位置		木星からの距離 - 開口					
			x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	観測日	イオ	エウロパ	ガニメデ	カリスト	
15.23.39.55	15.23.39.55	15.9.85316					23.64.2	159.6.2	23.91.0	164.8.8	23.51.0	155.2.8	159.86.08		-2.277	33.41	-58.32	
15.23.39.57	15.23.39.57	15.9.86018	637.15	1.617.8														
15.23.41.51	15.23.41.51	15.9.87140																
16.00.31.42	16.0.31.42	16.0.2201					23.61.0	156.5.4	23.76.1	161.8.3	23.47.8	152.0.2	160.21.38		-2.080	34.87	-67.63	
16.00.30.47	16.0.30.47	16.0.2139	236.78	1.584.8														
16.00.29.17	16.0.29.17	16.0.2034																
16.21.56.13	16.21.56.13	16.9.1404					23.05.0	163.3.5	23.13.5	165.8.7	22.85.1	156.8.5	168.15.28		3.051	58.11	-37.36	
16.21.56.01	16.21.56.01	16.9.1329	228.63	1.604.2														
16.21.56.01	16.21.56.01	16.9.1329																

#### (3) ガリレオ衛星の位置

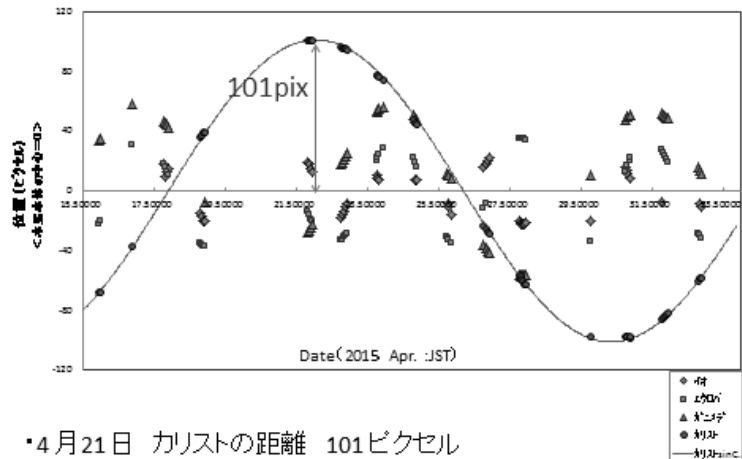
測定した衛星の位置が4つのガリレオ衛星のどれに当たるかは、いくつかの方法で調べることが出来るが、名古屋市立科学館のホームページ(HP)の「ガリレオ衛星の見え方」のページが簡単で確実である。撮影日時を入力することで、ガリレオ衛星の位置を表示してくれる。(ワークシート解説編:図3参照)

しかし、今回のWS会場はネット接続が不可能で、あらかじめ上記のHPで撮影時刻のガリレオ衛星の位置をスライド集(ガリレオ衛星の見え方201603WS.pdf)にして、実習体験者に配布して各自で調べられるようにした。

#### (4) 長半径の決定

「測定値・グラフ(WS実習)」シートに各自の測定結果を入力すると、木星本体を中心にしたガリレオ衛星の動きをしめすグラフが自動で作成される。カリストの動きを見るとSinカーブに乗っているように見え、その最も木星本体から離れた時の距離(振幅)を決める。これがpix単位で求めた画像上の木星本体からカリストまでの距離で、カリストの公転軌道の長半径(pix)

#### 実際の計算1 → 衛星(カリスト)の見かけの距離(pix)



にあたる。

ピクセル (pix) 単位で求めた軌道の長半径を角距離 (°) に換算するためには、まずは撮影画像の画角 (°) と画像の幅 (pix) の比率から角距離 (°) に直す。(右図、実際の計算 1~2 参照)

さらに地球木星間の距離 (地心距離 km) を使って、公転軌道の長半径 a (km) に換算する。(右図、実際の計算 4~5 参照)

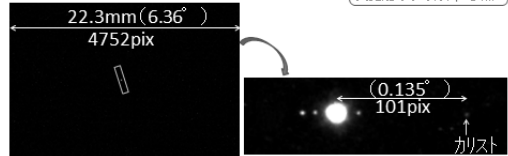
ここで使用する観測時刻の地球木星間の距離は国立天文台の HP から容易に知ることが出来る。(ワークシート: 解説編 図 9 参照)

今回の WS ではネットが使えないことから、あらかじめ、この HP で表示される観測期間中の 1 時間ごとの木星の地心距離のデータを木星質量計算表にコピーをしておき、ここから観測時刻に近い値を読み取って、計算に用いることにした。

(Galileo\_Calc 3\_20161009WS .xlsx)

#### 実際の計算 1~2 → 見かけの軌道半径 (°)

- カメラの焦点距離は 200mm
- 受光素子は APS-C で  
画角は  $\arctan(22.3/2/200) \times 2 = 6.36$  度
- 画像の全体幅は 4752 ピクセル
- カリストの見かけの軌道半径  
 $6.38 \times 101/4752 = 0.135$  度



#### 実際の計算 4~5 → 実際の軌道半径 (km)

- 観測時刻の地球と木星の距離 7.57 億 km (5.06 au)
- 軌道半径 (a)  
$$\frac{2 \times 3.14 \times (7.57 \times 10^8)}{179 \text{ 万 km}} \times (0.136/360) = 1.79 \times 10^9 \text{ m}$$
(木星軌道の全周)
- 公転周期 P=16.7 日 =  $16.7 \times 24 \times 3600$  秒
- 万有引力定数  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{GM}{4\pi^2} \quad \text{に } a, P, G \text{ を代入して}$$

$$M = 1.63 \times 10^{27} \text{ kg}$$

### (5) 木星質量の導出

これまでに得られた、軌道の半長径 a (km) と、カリストの公転周期 P=16.7 日を、ケプラーの第三法則と万有引力の関係から得られた方程式に代入して、木星の質量 M (kg) を求めることが出来た。公転周期は本来、観測で得られたカリストの位置変化を示すグラフの周期を使うべきであるが、実習の時間短縮のために理科年表に掲載の値を使うことにした。これらの値を、木星質量計算表 (SatelPos-20160321WS .xlsx) の「木星質量」のシートの各入力欄に入力して、自動で木星質量 (地球質量単位) を求めることができた。

### (6) 木星質量の自動計算

10 月の WS では時間の関係から、ガリレオ衛星の動きはさておき、各々の衛星が木星本体から最も離れた位置にある日の画像のみをサンプル画像として配布して、その衛星の位置の読み取りを行った。読み取った衛星の位置を木星質量計算表 2

(Galileo\_Calc 3\_20161009WS .xlsx)

の x y 座標入力欄に入力し、順次必要事項を入力することで、自動で木星質量を導出できるようにした。

## 4. 実習後の体験者へのアンケート結果 (2016. 10. 09WS)

以下の項目について、感想や意見、改良点など記入してもらった。

### (1) マカリのインストール、使用方法について

- 丁寧な説明でわかりやすかったと思います。先に各自の PC にマカリをインストールして自分でも動かしながら説明を聞くとさらによくわかると思います。

- ・マカリについては初めてであったが、もう少し深く知りたかった。
- ・Ver.2.0をインストールしてからVer2.1をインストールしたので、うまくいきました。これも広めて？いただいた方が良い重要な点でしょうか。
- ・システムエラーのトラブルシューティングはなかった。
- ・わかりやすくインストールできました。説明の間に一緒にインストールして、操作しながらの方が良かったと思います。
- ・実際にインストール操作しながらの説明が聞きたいと感じました。

## (2) ガリレオ衛星の位置測定（マカリ使用）について

- ・わかりやすかったと思います。マカリがいろいろなところに使えると感じました。
- ・中心を合わせるのが難しかった。
- ・焦点距離が公称値どおりとは限らないので、距離の判明している2星を測り、先に焦点距離を求めておくべきでしょう。
- ・よくわかりました。
- ・pixelの数で大きさがわかるが誤差はどのくらいか。
- ・説明の間に一緒にインストールして、操作しながらの方が良かったと思います。
- ・難しかったですが、何とか頑張ることができました。

## (3) 位置測定データの入力から木星質量導出の過程について

- ・めんどろな計算はすべてExcelでやってくれるので簡単でした。
- ・ほぼ期待どおりのデータが出て良かった。
- ・カリストの1周期以上の観測期間がありましたから、公転周期も求めて見たかったですね。難しい周期解析は必要ないです。概略の周期と振幅を与え、微小変化させて最小誤差を求めれば良い。エクセルでできます。
- ・エクセルであらかじめ式が入力されていましたが、手で計算をしてみようと思います。
- ・半自動と自動からだると最小自乗法をして残差0になるか。
- ・専門が違うこともあり、計算式等がわからないこともありましたが。自動計算だったので楽しむことはできました。
- ・計算方法を見て、確かに算出できると感じました。考えたことがない方法だったため、新鮮に思えました。

## (4) 天体の質量と衛星に関する考察について

- ・高校地学で学ぶ範囲でも、このような計算ができるのですね。
- ・物理の知識が必要だと思った。
- ・万有引力とケプラーの法則は良い教材ですね。
- ・自分もガニメデの観察を行っているので、是非自分のデータについても考えて行きたいと思います。

## (5) ワークシート（解説編、レポート編）について

- ・実習方法がうまくまとめられていたと思います。
- ・「カリスト」が「カストル」と書かれていたところがあった。
- ・情報科や他の教科で習ったことを応用できることも考えてよいか。

- ・見たら分かる、たいへん見やすいものでした。

#### (6)WS全般について（何でも結構です）

- ・望遠レンズで撮った写真から、木星の質量が求められるというのは驚きでした。生徒たちにも紹介したいと思います。
- ・ケプラーの法則、万有引力の法則の内容の発展的な学習として有効だと思いました。Excelシートもよく作り込まれていて、上記の法則に基づく計算プロセスを併せて学習できると思います。  
地学基礎（文系対象）では難しいのかもしれませんが、物理の学習やクラブ活動等では、有効な活動として展開できると思います。向学の機会となりました。ありがとうございました。
- ・とても参考になりました。ありがとうございました。
- ・高校地学・物理で有効に活用できると思った。教科書だけでなく、教師と生徒が撮影した写真（実データ）から求めることで、より探求的な学習と情報処理能力を身につけさせることができる。使ってみます。
- ・ありがとうございました。
- ・生徒の観測や教員のデータなどから学習できる。
- ・実際に体験してみて、とても楽しかったです。

#### 5. 今後の改良に向けて

実習のワークシートに合わせた、ガリレオ衛星位置データの処理と木星質量計算表をセットにした計算表やワークシートの指導者用解説書等を整備してサンプル画像と合わせてPaofitsWGの開発教材のHPにUPして、誰もが利用可能な状態にしていきたい。