

ガリレオ衛星の多色測光観測

岡山大学 理学部 地球科学科

05422523 矢野和希

2014/02/14

要旨

ガリレオ衛星はイオ，エウロパ，ガニメデ，カリストからなる木星の代表的な衛星である．ガリレオ衛星は特徴的なものが多い．イオには400以上の活火山があり，太陽系で最も地質学的に活発な天体であると考えられている．エウロパは表面を新しい氷がおおっており，内部には熱水噴出孔があると考えられている．ガニメデとカリストも同様に表面は氷で覆われている．またガニメデは見る面によって明るさが違うことがわかっている．

本研究では，ガリレオ衛星を地上から観測することにより，ガリレオ衛星の特徴がどれほどわかるか調べることを目的とした．

そのために本研究では，星空公園の 60cm 反射望遠鏡と冷却 CCD カメラを用いて B,V,R,IR の 4 つのバンド(波長)でガリレオ衛星を撮像した．撮像した画像から，各衛星の明るさ，自転による明るさの変化，アルベド，色味を測定し，衛星間で比較した．

結果，本研究では自転と明るさに相関を見ることはできなかった．衛星間で明るさ，アルベド，色味を比較することができた．

目次

第 1 序章

1.1 ガリレオ衛星-----	1
1.1.1 基本データ-----	1
1.1.2 イオ-----	1
1.1.3 エウロパ-----	1
1.1.4 ガニメデ-----	2
1.1.5 カリスト-----	2
1.2 研究目的-----	2

第 2 章 観測

2.1 観測方法-----	3
2.1.1 基本設定-----	4
2.1.2 星の明るさの決定-----	4
2.1.3 多色光観測-----	4
2.2 冷却 CCD カメラ-----	4
2.3 使用データ-----	5

第 3 章 解析方法

3.1 一次処理-----	7
2.1.1 ダーク-----	7
2.1.2 フラット-----	8
3.2 測光-----	10
3.3 品質管理-----	11
3.3.1 方法-----	12
3.3.1 残った衛星のデータ数-----	13
3.4 大気による減光補正-----	13
3.4.1 Airmass-----	14
3.4.2 補正方法-----	14

第 4 章 結果・考察

4.1 V バンド等級-----	16
4.1.1 比較方法-----	16
4.1.2 結果-----	16
4.2 自転による明るさの変化-----	17
4.2.1 衛星の自転-----	17
4.2.2 結果-----	18
4.3 アルベド・色味-----	20
4.3.1 アルベド-----	20
4.3.2 色味-----	20
4.3.3 結果-----	21

第5章 まとめ

謝辞

参考文献

第1章 序章

1.1 ガリレオ衛星

ガリレオ衛星とは太陽系で最も大きな惑星である木星の代表的な4つの衛星の総称である。軌道半径が小さいものから、イオ、エウロパ、ガニメデ、カリストとなっている。

1.1.1 基本データ

ガリレオ衛星の基本データを以下の表にまとめた。
以下のデータはマークス・チャーウンの太陽系図鑑から抜粋した。

表 1.1 ガリレオ衛星の基本データ

	軌道半径(km)	公転周期 (地球日)	自転周期 (地球日)	直径(km)	質量(トン×10 ¹⁹)
イオ	4.20~4.23×10 ⁵	1.77	1.77	3,643	8.9
エウロパ	6.64~6.78×10 ⁵	3.55	3.55	3,122	4.8
ガニメデ	8.45~12.78×10 ⁵	7.15	7.15	5,262	1.48
カリスト	1.87~1.90×10 ⁶	16.69	16.69	4,821	1.08

1.1.2 イオ

イオは最も木星に近いガリレオ衛星で、木星のまわりを約1.8日で回る。イオの表面は岩石で覆われている。イオは木星に非常に大きな重力で引っ張られている。この引っ張る力を潮汐力という。この潮汐力によりイオの内部は高温となっている。そのため、400以上の活火山を持っており、地質学的最も活発な天体であると考えられている。(マークス・チャーウンの太陽系図鑑から引用)111

1.1.3 エウロパ

エウロパは表面が氷で覆われている。起伏が少なく、クレーターさえみられない。エウロパの表面の氷の地殻の下は海が広がっていると考えられている。(マ

ーカス・チャーウンの太陽系図鑑から引用)

1.1.4 ガニメデ

ガニメデは、太陽系で最も大きな衛星である。表面は氷で覆われている。また、ガニメデはクレーターの多い部分と、少ない部分があることがわかっている。(マーカス・チャーウンの太陽系図鑑と宇宙情報センター http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/jupiter_satellite.html から引用)

1.1.5 カリスト

カリストの表面は氷で覆われている。また、ガリレオ衛星の中でクレーターの数が最も多い。(マーカス・チャーウンの太陽系図鑑から引用)

1.2 研究目的

本研究の目的は地上からの観測から天体を観測し、各天体の特徴をどこまで知ることができるか調べることである。

そのために、星空公園の 60cm 反射望遠鏡と冷却 CCD カメラを用いて B,V,R,IR の 4 つのバンド(波長)でガリレオ衛星を 2013 年 10 月 28 日から 2013 年 11 月 30 日に計 11 夜かけて撮像した。解析では、2013 年 10 月 28 日から 30 日の計 3 夜のデータのみを使用した。そのデータから、各衛星の明るさ、自転による明るさの変化、アルベド、色味を測定して各衛星間で比較した。

第 2 章 観測

2.1 観測方法

星空公園にある 60cm の反射望遠鏡に CCD カメラをつけて観測をおこなった．天文台の場所は井原市美星町大倉龍王山の頂上付近（東経 133° 34' 18, 北緯 34° 40' 48, 標高 538m）に位置している．観測期間は 2013 年 10 月 28 日から 11 月 1 日の 5 夜と，2013 年 11 月 8 日から 10 日の 3 夜，2013 年 11 月 26 日から 28 日の 3 夜の計 11 夜である．



図 2.1 星空公園 60cm 反射望遠鏡

2.1.1 基本設定

ガリレオ衛星は明るい天体なので露出時間は 0.12 秒とした．撮像の際の CCD 冷却温度は -20℃ と設定した．ガリレオ衛星を 4 つのバンドで 20 枚ずつ計 80 枚撮像することを 1 回とし，一夜の観測で 7～10 回観測した．一つのバンドで観測するのにかかる時間は約 2 分で，1 回の観測にかかる時間は約 10 分である．各回の観測は図 2.2 に示すように約 20 分ごとにおこなった．

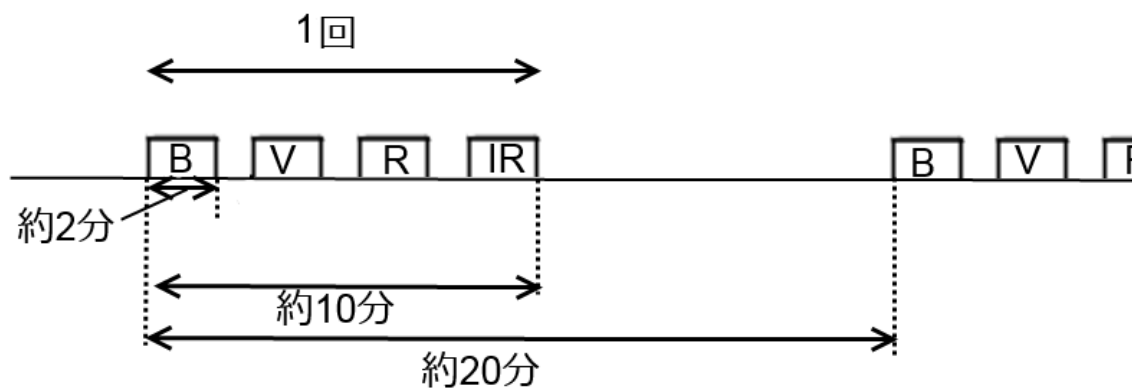


図 2.2 観測の間隔

2.1.2 星の明るさの決定

本研究ではある時刻の各衛星の一つのバンドの明るさを求めるために 20 枚の画像を撮像し、20 枚の画像から各衛星の 20 個の明るさをもとめて、各衛星の 20 個の明るさを平均し、それを各衛星のその時刻の明るさとした。日本トランジット観測ネットワーク (<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/ida/transit/pukiwiki/index.php?TransitNetwork>)によると、露出時間が短いとシンチレーションの影響を強く受けてしまい、データがばらついてしまうとされている。宇宙を見るⅡ<応用編>によると、シンチレーションとは、大気の揺らぎによって星の明るさが変動することであるとされている。例えば、星のまたたきなどがシンチレーションの一種である。つまり、あまり露出時間が短いと大気の揺らぎによって明るさが変動してしまう。しかし、ガリレオ衛星は比較的明るい天体のため本研究では露出時間を 0.12 秒にする必要があった。そのため、ほぼ同時刻に 20 枚の画像をとってそれを平均して一つのデータとすることにより大気による揺らぎの影響を減らした。

2.1.3 多色測光観測

本研究では B, V, R, IR の 4 つのフィルターを使用した。君が天文学者になる 4 日間テキストによると、B, V, R, IR とは主に青色を通す B(Blue)、黄色から黄緑色を通す V(Visual)、赤を通す R(Red)、赤外線領域を通す IR(Infrared)である。それぞれが通す波長帯を B バンド、V バンド、R バンド、IR バンドとよぶ。

2.2 冷却 CCD カメラ

CCD カメラ(以下 CCD)は、シャッターを開いている間に入射した光子を電子として蓄え、その電子の数を数えることによって明るさを測定する。電子の数を数えることをカウントするといい、測定した電子の数をカウント値という。

宇宙を見るⅡ<応用編>によると、CCD の特徴として量子効率がよいことがあげられ、CCD の量子効率は 90%にもなる。量子効率とは光に対する感度のことである。比較として人の目の量子効率は 1%以下で写真看板でも数%である。

本研究では SBIG STL-1001E という冷却 CCD カメラを使用した。画素数は 1240×1240 である。画素数とは電子を蓄える容器の数のことである。この容器一つのことを素子といい、画素数が 1240×1240 であるということは素子が 1240×1240 あるということである。一つの素子に最大約 63000 個の電子を蓄えることができる。冷却能力は、外気温より最大で -40°C 冷却できる。CCD を冷却することにより、ダークノイズ(ダークノイズについては 3.1.1 で説明する)を軽減することができる。露出時間は最短で 0.12 秒、最長 3600 秒である。

CCD カメラ SBIG STL-1001E の製品情報は株式会社マゼラン CCD カメラ部門「SBIG ジャパン」のウェブページ(<http://www.sbig-japan.com/STL-1001E.html>)から引用した。



図 2.3 今回使用した CCD カメラ

(画像は <http://www.sbig-japan.com/STL-1001E.html> から引用)

2.3 使用データ

以上の作業をおこない 2013 年 10 月 28 日から 11 月 28 日の計 11 夜の間に観測したデータ計 34 回のデータを得た。しかし、画像から天候があまりよくないと判断した日のデータと、一枚の画像に 4 つの衛星が入っていない日のデータは本研究では使用しないことにした。そのため本研究では、10 月 28 日から 30 日に観測した計 23 回のデータのみを使用した。

表 2.1 観測の詳細(×は天候不良により観測できなかった日である)

	10/28	10/29	10/30	10/31	11/1	11/8	11/9	11/10	11/26	11/27	11/28
観測時間	24-28	24-29	23-27	×	×	27-27	×	26-26	×	×	24-26
データ数 (回)	10	7	6			1		3			7

第 3 章 解析

本研究では撮影した星の画像を解析するのに、フリーソフトウェアマカリイ (<http://www.nao.ac.jp/others/Makalii/index.html>)を使用した。

3.1 一次処理

CCD で撮影した画像はダークノイズと CCD の素子の感度ムラを補正をする必要がある。この補正を一次処理という。一次処理の方法については『君が天文学者になる 4 日間テキスト』という資料を参考にした。

3.1.1 ダーク

CCD は光が全く入らない状態にしているにもかかわらず電子の熱運動(暗電流ノイズ)によって放出された電子をカウントしてしまう。これをダークノイズという。ダークノイズの大きさは、露出時間と CCD の冷却温度によって決まる。ダークノイズのみを撮像した画像(ダーク・フレーム)を作成し、観測した画像(オブジェクト・フレーム)から引き算することでダークノイズを補正する。この作業をダーク引きという。

ダーク・フレームの撮像方法は CCD に全く光が入らない状態で撮像する。ダークノイズの大きさは、露出時間と CCD の冷却温度によって決まるため、オブジェクト・フレームを撮影した時の露出時間と CCD 冷却温度で撮像した。本研究では、望遠鏡の中蓋を閉じた状態で 100 枚のダーク・フレームを撮像し、撮像した 100 枚のダーク・フレームの中央値をとって、ダーク引きに使用する合成ダーク・フレームを作成した。

マカリで合成ダーク・フレームを作成するには以下の手順で行う。加算演算からバッチ[加算平均と中央値]を開く。リストに追加で撮像した 100 枚のダーク・フレームを選択する。合成方法を中央値にして OK を押す。

以上から作成した合成ダーク・フレームが図 3.1 である



図 3.1 合成ダーク・フレーム

3.1.2 フラット

CCD で撮像した画像には大きく分けて 2 種類のムラがある．一つ目は CCD の感度のムラで，二つ目はフィルターや CCD についたゴミや，周縁減光による光学系による感度のムラである．周縁減光とは，光が鏡筒などによって遮られ画像の周辺部が暗くなってしまうことである．これら 2 種類のムラを補正するため一様な明るさのものを撮像した画像(フラット・フレーム)で割り算する．この作業をフラット割という．

フラット・フレームは，明るさが一様な光を望遠鏡に入射させることで撮像できる．本研究では，夜明け前の空を撮影することでフラット・フレームを得た．露出時間は 1 秒とし，B, V, R, IR の各フィルターで 20 枚ずつ撮像し，カウント値の平均が 4 万付近のものを使用した．結果各バンドで 20 枚ずつ計 80 枚のフラット・フレームを得た．このフラット・フレームにもダークノイズが含まれているため，露出時間を 1 秒にした合成ダーク・フレームを作成して，ダーク引きをおこなった．ダーク引きをおこなった後に各バンドで加算平均をとり合成フラット・フレームを作成した．

マカリで合成フラット・フレームを作成するには以下の手順で行う．データ一時処理からバッチ[共通バイアス・ダーク・フラット]を開く．対象ファイルリスト(L):のファイルを追加でフラット割に使用するフラット・フレームをすべて選択する．処理後で保存場所を別のフォルダに保存を選択して保管場所を決める．これは，もとの撮像したデータを残しておくためである．ダーク補正にチェックを入れ，ダーク補正画像ファイルに 1 秒で撮像したダーク・フレームから作成した合成ダーク・フレームを選択する．このとき他の補正にチェックが

ついていれば消しておく。OK を押すとダーク引きができる。加算演算からバッチ[加算平均と中央値]を開く。以下の作業は各バンドで行う。リストに追加でダーク引きをおこなった 20 枚のフラット・フレームを選択する。合成方法を加算平均にして OK を押す。この作業で、各バンドの合成フラット・フレームを作成できる。

以上から作成した合成フラット・フレームが図 3.2 から図 3.5 である。これらの合成フラット・フレームからは中心部と隅の方が暗くなっていることがわかる。

リング状になっているものはフィルターについた埃だと推測できる。リング状になっているのはピントが合っていないからである。

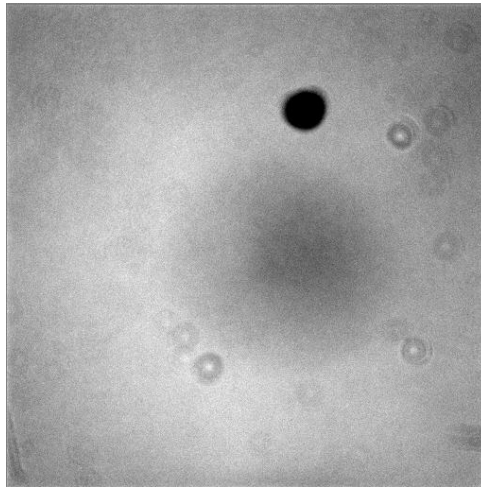


図 3.2 B バンドの合成フラット・フレーム

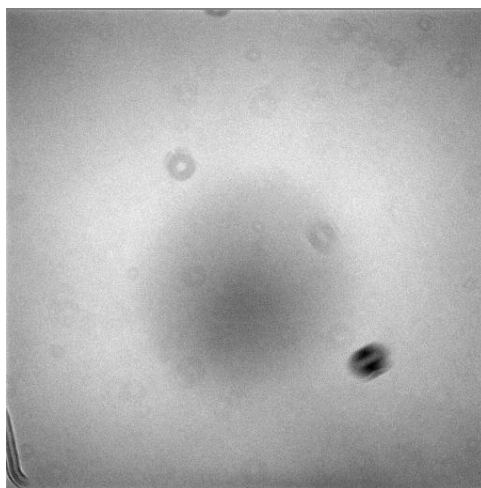


図 3.3 V バンドの合成フラット・フレーム

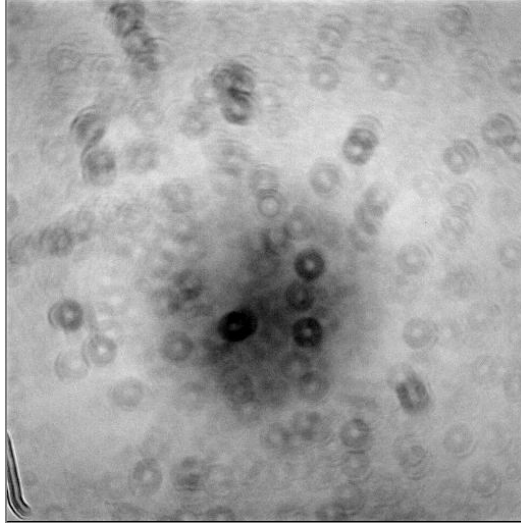


図 3.4 R バンドの合成フラット・フレーム

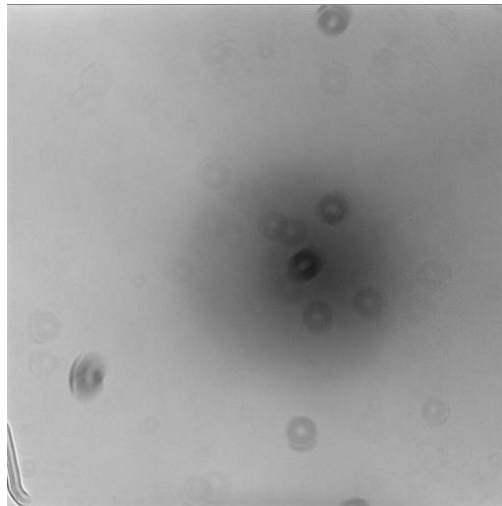


図 3.5 IR バンドの合成フラット・フレーム

3.2 測光

測光とは天体の明るさを求めることである．測光をする際に気をつけないといけないことは空の明るさを考慮に入れないといけないことである．地上から観測した時，天体の明るさには空の明るさも含まれている．図 3.7 は図 3.6 の青いラインの星と空の明るさを表わしている．赤のラインより下が空の明るさを表わしており，観測した星の明るさには空の明るさに上乗せされている．そのため，空の明るさを引く必要がある．天体部分の明るさから空の明るさを引き算したものを天体のみ明るさとする．

ソフトウェアマカリィを使った測光方法を説明する．まず開くから一次処理

をおこなった天体の画像を選択する．測光を押して開口測光を選択する．すると，カーソルが測光用のリング状のカーソルに変わる．そのリングの中心に測光したい天体が来るようにしてクリックすると測定結果が出てくる．図 3.8 が測光用のカーソルである．ピンクのリングの内側で天体の明るさを測定している．黄色い二つのリングの間を空の明るさと考え天体の明るさから引くことで星の明るさを求める．星像はもともと点であるが大気のゆらぎの影響やピントのずれによって広がって観測される．そのため，ピンクのサークル内のカウント値を足したものを星の明るさとする．マカリィの測定結果は STAR, SKY, COUNT の 3 つが出てくるが，COUNT が天体の明るさである．この結果はテキスト出力を選択することで “ファイル名.csv” の形で保存する．この作業をすべての画像におこない，23 回×80 枚×4 衛星の計 7360 の明るさのデータを得た．



図 3.6 ある星の画像

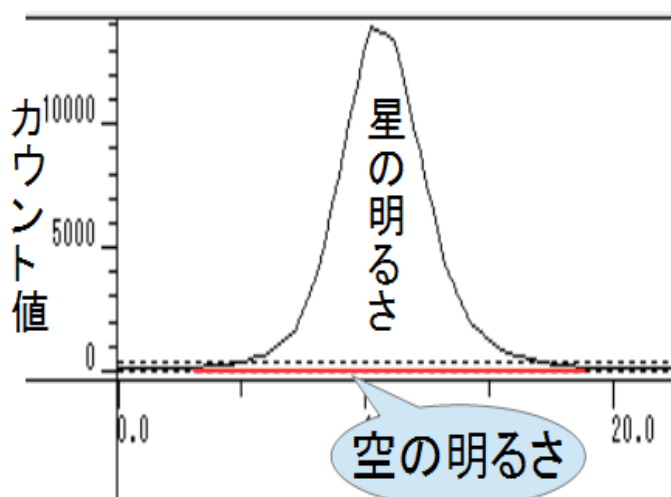


図 3.7 図 3.6 の青いラインの星と空の明るさ

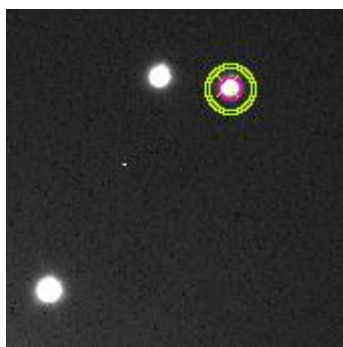


図 3.8 マカリィの測光の様子

3.3 品質管理

地上から天体を撮像する際、天候や宇宙線の影響を受けるため品質管理をする必要がある。以下の三つの方法で品質管理をおこなった。

3.3.1 方法

本研究ではある時刻の各衛星の一つのバンドの明るさを求めるために 20 枚の画像を撮像し、20 個の明るさをだした。その 20 個の明るさから平均値と標準偏差を求めた。その平均と標準偏差を用い、品質管理のための以下の三つの作業をおこなった。

一つ目は“平均値から 3 倍の標準偏差以上離れたものは捨てる”である。20 個のデータは 2 分程度の間に取られたデータなので天体の明るさがその期間に大きく変化することは考えにくい。そのため、平均よりあまり離れたデータは環境によって影響を受けたと考え除去した。図 3.9 でいう緑のラインより上のデータと、紫のラインより下にあるデータを捨てた。青の点が 20 個のデータで、赤のラインが平均値、緑のラインが平均値プラス標準偏差で、紫のラインが平均値マイナス標準偏差である。この場合は、対象のデータが写っている画像を捨てた。

二つ目は“標準偏差割る平均が 0.03 より大きなものは捨てる”である。同様に 2 分間のうちに天体の大きさが変化するとは考えにくい。あまりに標準偏差が平均値に対して大きいものは捨てた。図 3.10 のようなデータを捨てた。この場合は、この回の対象のバンドを捨てた。

三つ目の作業は、以上の作業を終えた後に、バンド内で同時刻に撮像した 4 つの衛星の明るさを足して、各バンドで横軸を Airmass(Airmass については 3.4.1 で説明する)として比較する。そこであまりにも外れたデータを除外した。図 3.11 の赤い色のようなデータである。これは、薄い均一の雲がかかってしまい、全体的に暗くなってしまったものと考えられる。

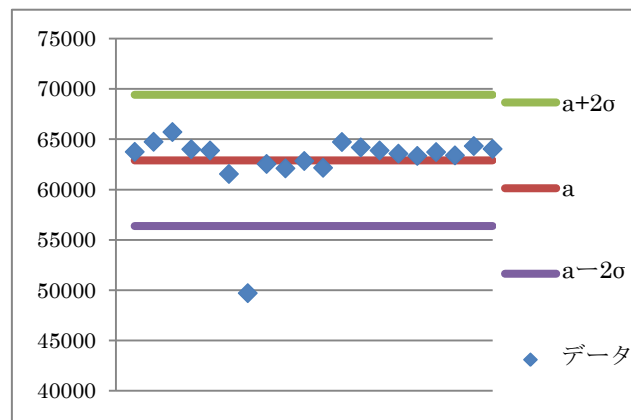


図 3.9 平均値から 3 倍の標準偏差以上離れたものは捨てる場合

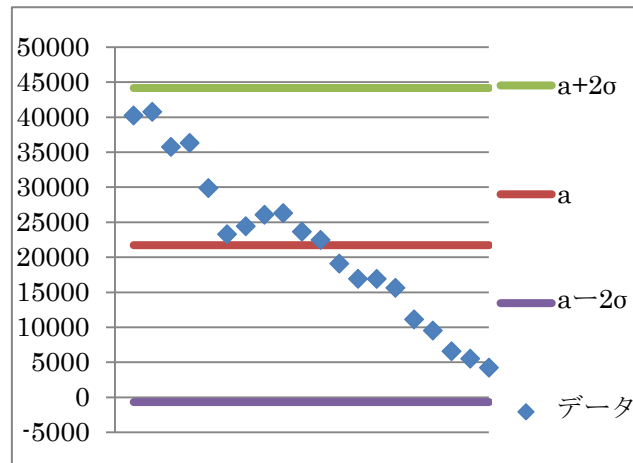


図 3.10 標準偏差割る平均が 0.03 より大きなものは捨てる場合

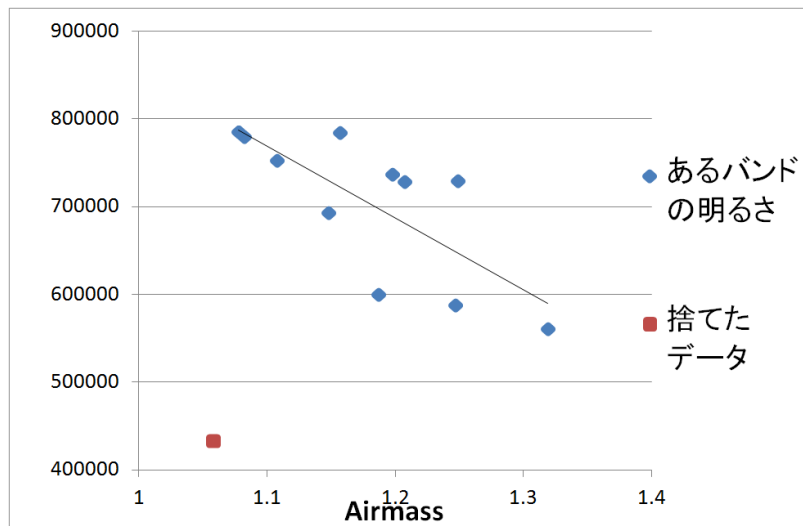


図 3.11 ある時刻の明るさがあまりにも他の明るさと離れている場合

3.3.2 残った衛星のデータ数

以上の作業から選定した結果, B バンドで 11, V バンドで 11, R バンドで 13, IR バンドで 11 の衛星の明るさのデータが残った.

3.4 大気による減光の補正

地表で観測すると大気の影響を必ず受ける. 大気による減光とは, 天体の光が大気を通り抜ける際に, 散乱や吸収されて星のみかけの明るさが暗くなることである. 大気による減光の大きさは各バンドによって異なる. そのため各バンドで大気による減光の補正をする必要がある. 各バンドで各時刻の 4 つの衛

星の明るさの平均値の和を縦軸にし，横軸を **Airmass** とした座標に，品質管理後の観測データを記入する．それらのデータを近似する直線である回帰直線を求め，**Airmass** が 1 の時の星の明るさに補正した．

3.4.1 Airmass

Airmass とは地平高度が 90° の時の大気の厚さを 1 とした時観測する天体の光が通過する大気の厚さのことで， $1/\sin(\text{地平高度})$ で表す．図 3.12 の赤いラインである．地平高度が低くなるほど **Airmass** は大きくなる．大気による減光は **Airmass** の大きさに比例していると仮定し，回帰直線を使って大気による減光を補正した．

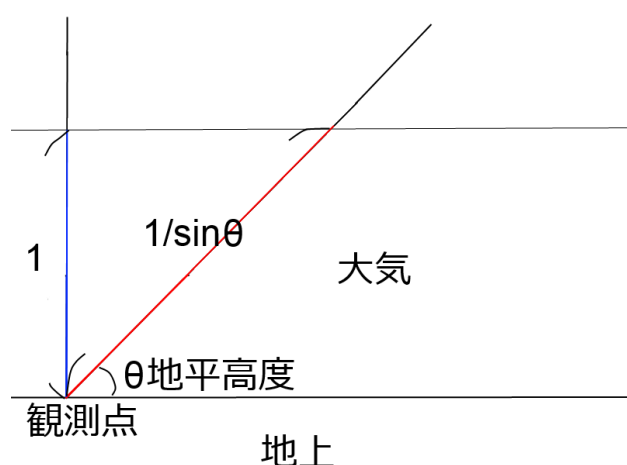


図 3.12 Airmass

3.4.2 補正方法

大気による減光の補正方法として，各時刻の各バンドの 4 つの衛星の明るさの平均値の和(以後各バンドの明るさ)を縦軸にし，横軸を **Airmass** としたものから回帰直線を求める．この回帰直線を用いて大気の影響が最も少ない **Airmass** が 1 のときの明るさに補正する．

回帰直線の求め方からまとめる．直線を求めるためには，傾きと縦軸切片を求める必要がある．各バンドの明るさと **Airmass** の相関係数(以後相関係数)とそれぞれの標準偏差を用いて，以下の式から回帰直線の傾きと縦軸切片を求める．

$$a = \rho \times \frac{\sigma_I}{\sigma_a}$$

$$b = I_a - a \times A_a$$

a を回帰直線の傾き, b を回帰直線の縦軸切片, ρ を各バンドの明るさと Airmass の相関係数, σ_I を各バンドの明るさの標準偏差, σ_A を Airmass の標準偏差, I_a は各バンドの明るさの平均値, A_a は Airmass の平均値とする.

この回帰直線から大気による減光の補正をおこなう. 大気による減光の補正のために以下の係数を品質管理が終わった明るさのデータに掛け算する.

$$\frac{a \times 1 + b}{a \times x + b}$$

a を回帰直線の傾き, b を回帰直線の y 切片, x を補正する天体を観測した時の Airmass とする.

この作業によって各バンドの明るさが図 3.13 から図 3.14 になった. 図 3.13 が大気による減光処理前で, 図 3.14 が大気による減光補正後である. 今後の作業は大気による減光補正後のデータを用いる.

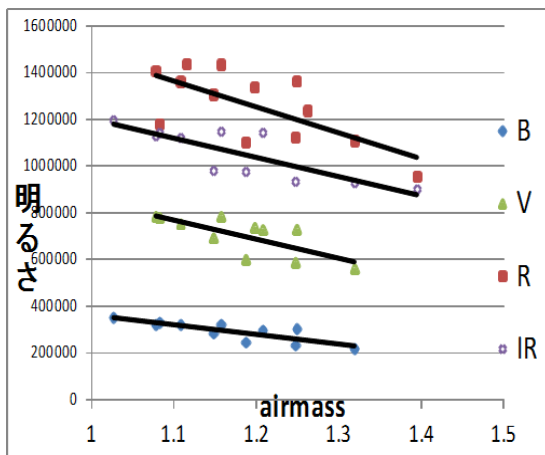


図 3.13 大気による減光処理前

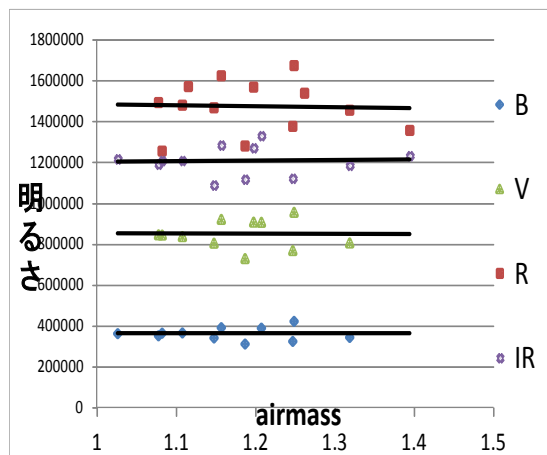


図 3.14 大気による減光補正後

第 4 章 結果・考察

4.1 V バンド等級

今回の観測で明るさが正しく観測できているかを確認するために観測した等級と過去の観測で求められた値と比べた。今回の観測では明るさの絶対値をはかっていないのでそのままでは比べることができない。そこで、自分で観測した 4 つの衛星の V バンド等級の平均値と Millis and Thompson(1975)で求められた 4 つの衛星の V バンド等級の平均値が同じになるようにして比べた。

4.1.1 比較方法

比較方法を説明する。今回観測によって得られた衛星の等級を求めるため、以下の作業をおこなった。

エウロパ、ガニメデ、カリストのイオとの等級差をそれぞれ e, g, c とする。観測によるイオの等級を V とすると、エウロパ、ガニメデ、カリストの等級はそれぞれ $(V+e)$, $(V+g)$, $(V+c)$ となる。Millis and Thompson の結果の等級を V_i , V_e , V_g , V_c として以下の式が成り立つことを仮定して、観測したガリレオ衛星の等級を求めた。

$$V + (V+e) + (V+g) + (V+c) = V_i + V_e + V_g + V_c$$

これより求めた等級と Millis and Thompson の結果の等級を縦軸は自分で求めた V バンド等級、横軸は Millis and Thompson で求めた V バンド等級として図 4.1 を作成し、比較した。

4.1.2 結果

図 4.1 から、明るさの絶対値については不確定があるが、衛星間の相対的な明るさについては Millis and Thompson とほぼ同等の結果が得られたということが確認できた。

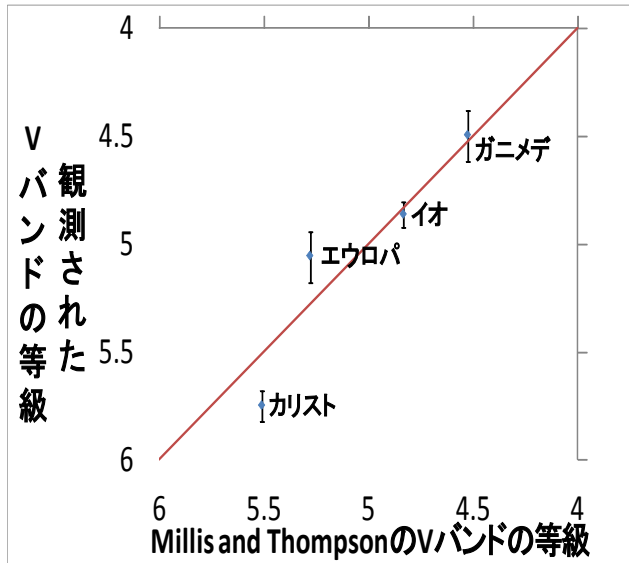


図 4.1 V バンドの等級

4.2 自転による明るさの変化

本研究ではガリレオ衛星を 3 日間連続で観測することができた. 3 日間連続で観測できたデータから, 自転と明るさの変化について考察した.

4.2.1 衛星の自転

図 4.3 は下の円が地球, 上の円が自転する観測天体を表わしている. 観測している天体が自転することにより, 地上から見える面が変わることが図 4.3 を見ればわかる. また, 観測天体のアルベドが観測する面によって変われば一定期間の連続した撮像からそれが読み取れるはずである. 図 4.4 で説明すると, 白い部分が黒い部分よりアルベドが高い部分であるとする. 観測天体の自転により地上から観測できる衛星の表面が図 4.4 の左の図から右の図に写ると地表面から観測できる天体の面のアルベドは小さくなり, 観測される明るさが暗くなる.

衛星の自転と明るさとの間に相関があるかを調べる.

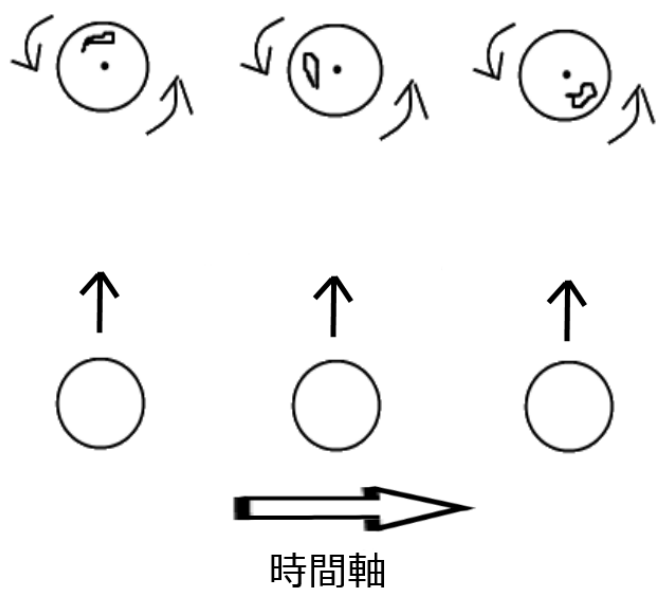


図 4.3 自転による見える面の変化

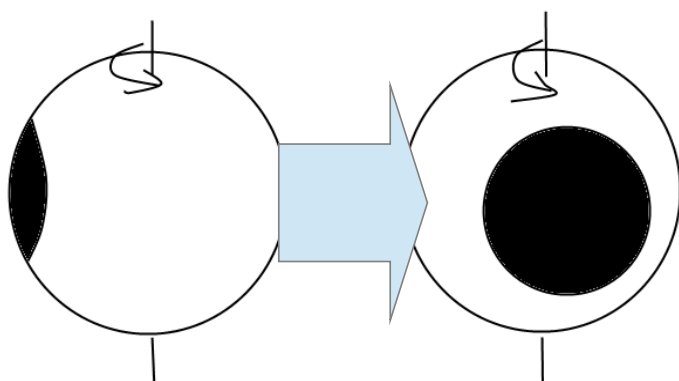


図 4.4 観測面によるアルベドの変化

4.2.2 結果

各衛星の 1 周を 360° として横軸にとり，自転と明るさに相関があるかを調べた．各衛星で自転の速度が異なるため，以下の式で横軸を定める．なお，横軸の開始時刻は，また， 360 を超えたものは 360 よりも小さくなるまで 360 で引き算し， 360 よりも小さくなったものを横軸の値とした．

$$y = \frac{360}{T \times 24 \times 60} \times t$$

y を縦軸， T は各衛星の自転周期(地球日)， t は 29 日 0 時から観測するまでに経

過した時間(m). 縦軸は, B-V, V-R, R-IR の等級差と V のカウント値とした.

結果として観測誤差が予想される自転による明るさの変化よりも大きいため, 今回の観測ではどの衛星においても自転と明るさに相関があるかどうかわからなかった.

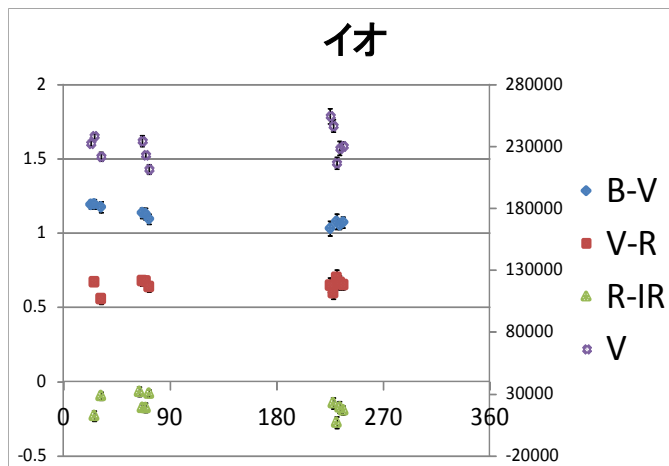


図 4.5 イオの自転による明るさの変化

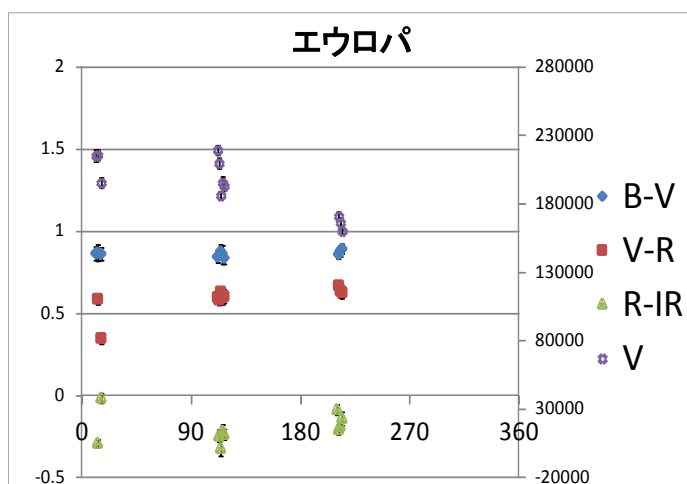


図 4.6 イオの自転による明るさの変化

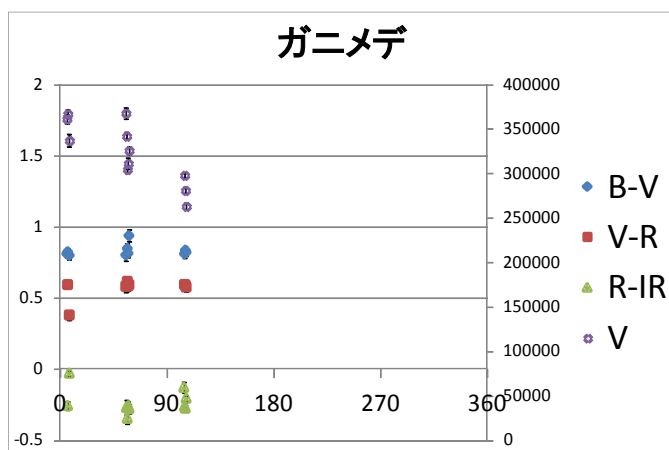


図 4.7 イオの自転による明るさの変化

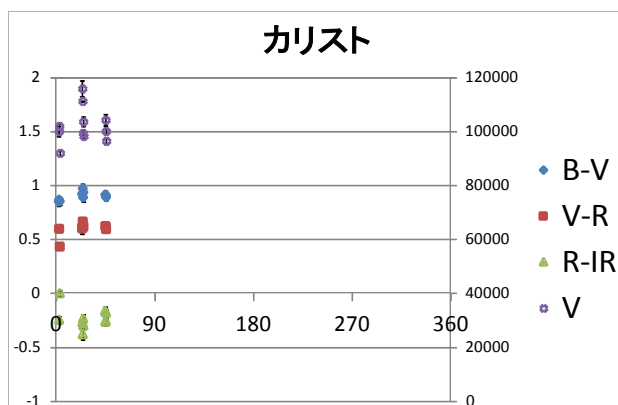


図 4.8 イオの自転による明るさの変化

4.3 アルベド・色味

次に、各衛星間でアルベドと色味を比較する。

4.3.1 アルベド

アルベドとは反射率のことである。

$$I = L \times \alpha \times S$$

I は明るさ、 L は太陽光度、 α はアルベド、 S は断面積である。

過去の観測で測られている衛星の大きさから断面積を計算すると、反射率の大きさを見積もることができる。反射率は物質によって異なるため、反射率がわかると衛星表面の物質の情報が得られる。ただし、今回の観測では明るさの絶対値をはかっていないため、反射率の絶対値を求めることはできない。そこで今回は衛星の色味を比較してみることにした。

4.3.2 色味

本研究で用いる色味について説明する。本研究ではでは色味を赤っぽい、青っぽい程度の意味で使用した。赤色の反射率と青色の反射率を比べた時、赤の反射率の方が大きいものは赤っぽく見え、青の反射率の方が大きいものは青っぽく見える。このようにして衛星間での色味を比較する。また、色味を比較す

るだけであれば、反射率の絶対値がなくてもできる。

4.3.3 結果

エウロパを基準とした時の色味を図に描いた。図 4.3 は横軸を各バンド、縦軸を各バンドにおいて以下の式で計算してだした値として描いたものである。

$$\frac{I}{\frac{S}{I_e}} \frac{I_e}{S_e}$$

I は各衛星の明るさ、 S は各衛星の断面積、 I_e はエウロパの明るさ、 S_e はエウロパの断面積である。エウロパは自分自身の値で割っているのですべてのバンドで 1 になる。図 4.3 上ではエウロパよりも反射率の大きいと 1 より上になり、エウロパよりも反射率の小さいと 1 より下になる。

傾きは、色味を表している。右上がりのものはエウロパよりも赤っぽく、右下がりであればエウロパよりも青っぽいことになる。ガニメデとカリストはほぼ水平であり、エウロパと似た色味であることがわかる。このことは 3 つの衛星とも表面が氷で覆われていることと一致している。一方でイオは右上がりになっていて、エウロパよりも赤っぽくなっている。探査機によって撮影された衛星の画像を見ても確かにイオは赤っぽく、正しく観測されているように思われる。

また、アルベドの大きさの相対的な比較をすると、エウロパ、イオ、ガニメデ、カリストの順番になる。このことも、過去に行われている観測と一致している。

イオは他の 3 つの衛星と色味が違うということからその表面が他の 3 つとは違うもので覆われていることがわかる。事実、イオのみが表面は岩石でできており、その他の 3 つの衛星は表面が氷からなっている。エウロパ、ガニメデ、カリストこの 3 つの衛星は色味が同じですがアルベドは異なる。太陽系外縁部小天体研究の現状－太陽系の果てを求めて－によると、氷の天体は、長期間宇宙空間にあると宇宙線にさらされ表面に有機物が形成され反射率が低下するとある。また、宇宙を漂う氷－氷衛星・彗星・氷星間塵の歴史を探る－によると、エウロパの外側のガニメデ、さらに外側のカリストの順に、クレーターの数は増しており、クレーターの数が多いほど、地質学的に古い。したがって、エウロパ、ガニメデ、カリストの 3 つの衛星のアルベドの違いは表面にある氷の年代が異なるためであるといえる。

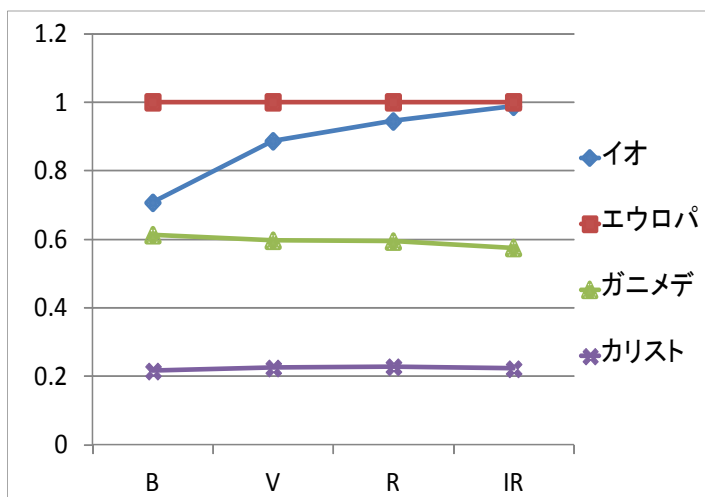


図 4.9 色味とアルベド

第5章 まとめ

今回の研究で，Vバンドの明るさと過去の観測で求められた値の比較から明るさの大小関係は等しく観測できた．

本研究の観測では観測誤差が大きいため衛星の自転と明るさの相関を見ることができなかった．

4つの衛星アルベドの大小関係を比較することはできた．また，色味の違いから表面の物質の違いは考察できた．

謝辞

本研究を行うにあたり、御指導いただきました指導教員であるはしもとじょう一准教授に心より感謝いたします。

美星天文台綾仁一哉台長、前野将太技師には星空公園の望遠鏡の整備をしていただき、また整備方法について教えていただきました。

同研究室の戸田晃太さんには天文学における基礎知識から観測の仕方までご指導いただきました。石岡翔さんには研究を進める上で様々なアドバイスをいただきました。また、堀駿さんには観測を行う上で様々なお手伝いをしていただき、本研究を支えていただきました。

参考文献

君が天文学者になる 4 日間テキスト (2007)

米原 厚憲 著

宇宙を見るⅡ〈応用編〉 恒星社, 1991, PP319

横尾 武夫 著

マーカス・チャーウンの太陽系図鑑 O'REILLY, 2012, 糸川洋 訳, 223

マーカス・チャーウン 著

Millis and Thompson(1975)

UBV Photometry of the Galilean Satellites, Icarus, 26, 408-419

太陽系外縁部小天体研究の現状 ―太陽系の果てを求めて― PLANETARY
GEOLOGY NEWS, Vol. 11 No. 4 Dec. 1999

渡部潤一 Jun-ichi WATANABE

宇宙を漂う氷―氷衛星・彗星・氷星間塵の歴史を探る― Is Integration Vol.14 No.8(2001)

法澤公寛, 矢田猛士, 池谷元伺

CCD カメラ SBIG STL-1001E の製品情報は株式会社マゼラン CCD カメラ部門
「SBIG ジャパン」のウェブページ

<http://www.sbig-japan.com/STL-1001E.html>

日本トランジット観測ネットワーク

<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/ida/transit/pukiwiki/index.php?TransitNetwork>

フリーソフトウェアマカリィ

<http://www.nao.ac.jp/others/Makalii/index.html>

宇宙情報センター

http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/jupiter_satellite.html