

# 月食画像を用いた月の微小視差検出

月の視差を使って地図を描く

伊藤信成（三重大学教育学部）

## 1. はじめに

月食は、新聞・TV の報道も含め、開始前には様々な情報が発信され、また晴れてさえいれば特別な機材がなくても観察することができるため、天文・宇宙への興味・関心を喚起する現象として有効である。一方で、端的に言えば“見たらお終い”であり、終了後には話題に上ることは少なくなる。この状況を少しでも改善し、月食終了後も興味を維持してもらえようような取り組みはないかと考えている中で、月食写真を取り上げることの思いついた。2012年5月21日に日本の広い地域で金環日食となった際には、北限界線の共同観測プロジェクトが実施され、1万人を超える市民が参加した（石坂ほか、2012）。このプロジェクトは、個々のデータの精度は低くても多数のデータを集めることでサイエンスができることを示したものである。また、Lawrence (2004)は、アマチュア天文家の参加を募り、2004年10月の皆既月食において、大西洋を挟んだイギリス・カナダ・ブラジルの3地域で同時に皆既月食を撮影し、視差を検出する取り組みを行っている。このような先例を参考に、皆既月食に対して多くの人が能動的に観測に参加し、得られたデータを利用して科学的な成果を得ることができる取り組みを検討した。Lawrence (2004)のプロジェクトは、天体までの距離に反比例して視差の大きさが変化するという注目したものであったが、最終的に得られた合成画像に写っている3つの月の位置は、地表面上の位置関係が反転して天球に投影されるという視差の基本的な性質を明瞭に反映したものとなっている。視差を扱う場合、2点間での視差の大きさに注目する機会が多いが、視差は大きさと方向を持つベクトル量であるので、視差の大きさと方向を用いて地表面上での観測点の相対位置関係を求めることができるはずである。複数の観測点の相対位置を2次元平面上にプロットすれば、それは地図となる。

以上を踏まえ、2014年10月8日の皆既月食を対象とし、三重県各地においてデジタルカメラ

で撮影した月食画像から視差を検出し、その視差の違いを利用して観測点の相対位置を求める試行的実践を行った。視差は基線長が短くなると検出が難しくなるので、県内という狭い範囲内で視差検出をする点が挑戦的取組みとなる。

なお、原理的には今回用いた視差算出の方法は、皆既月食以外の時でも適用できる。しかし通常の満月では夜空が明るく、星が写りにくい。その点、皆既月食中は新月期と同程度まで夜空が暗くなるため（星空公団、2011）、月近傍の星を月とともに写すことが可能となる。加えて、月食という発生頻度がそれほど高くない現象を対象とすることで、多くの人の関心を引くことができ画像収集を行い易いという利点もある。

## 2. 観測点の相対位置推定の方法

視差の大きさは基線長 $l$ に比例するため、2点の距離が短いと視差が小さくなり、その検出が難しくなる。図1aは三重県の主要都市の位置をしたものであるが、三重県は南北に長い県であり、端に位置するいなべ市と南端に位置する紀宝町の直線距離は約160kmである。地球-月間距離を $3.8 \times 10^5$ km、地球上での基線長を160kmとした場合の視差を計算すると $1.4'$ となる。この値は、月の視直径の $1/20$ 以下である。いなべ市と紀宝町で同時撮影した月画像を、背景の星を基準に重ね合わせた場合のシミュレーション画像を図1bに示す。視差によって月の位置がずれていることがわかるが、三重県内での最長基線をとった場合でも、月画像をそのまま重ねるだけでは都市の位置を明確に区別することは困難である。そこで、今回は月の中心位置を視差検出に用いることとした。中心は点であり、わずかな視差の違いも検出できるはずである。

図1aに示した都市間で最も基線長が短いのは四日市-鈴鹿間の10kmで、視差にすると $5.4''$ となる。そこで今回はその $1/2$ の $2.7''$ の視差検出精度を目標とした。

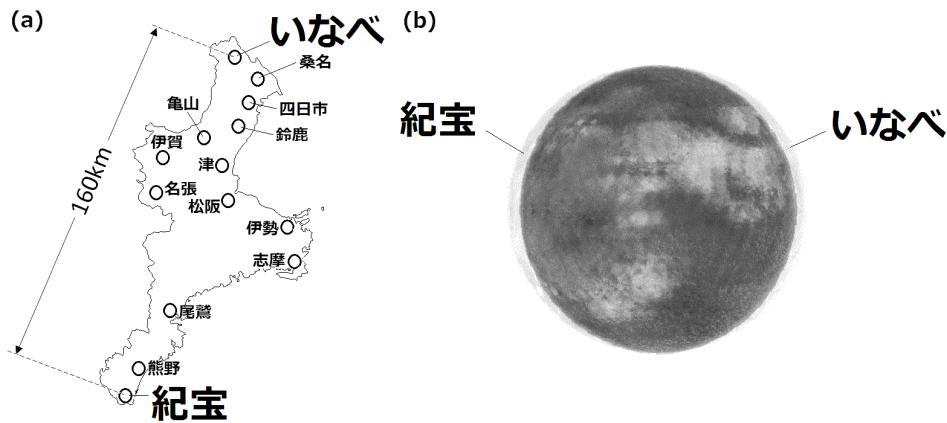


図 1: a)三重県内の都市配置, b)いなべと紀宝で撮影した月画像合成のシミュレーション画像

月中心の視差を検出するため本研究で採用した解析手順は、1) 画像上での月中心位置の推定と、2) 推定した月中心の赤経・赤緯の算出という2つの過程に大別できる。まず1)については、画像解析ソフト ImageJ (Abramoff, *et al.*, 2004) を用いた<sup>†</sup>。月中心の推定では、まず画像を2値化した上で、月を楕円フィットして中心座標を求めていく。皆既中の月面は全体として輝度が低く、月周囲にハレーションが起きにくいいため、月全体を比較的容易に2値化することができる。次に2)の月中心位置の赤経・赤緯の算出には天体画像自動検査ソフト Pixy システムを用いた (吉田, 1998) <sup>‡</sup>。Pixy システムは、画像内の天体を検出し、星表との比較から天体位置の算出ができる。月中心の座標算出では、まず月周囲に写っている星の座標を用いて画像上での位置と天球座標系の一つである赤道座標系との対応をつける。この対応関係が得られれば、1)で推定した月中心位置を赤道座標系での座標値に変換でき、観測点間の結果を比較できるようになる。

### 3. データの収集

三重県内各地の月食画像を収集するには研究室の人員だけでは無理があったため、一般市民に画像提供を呼びかけることとし、県内全域に向け広報活動を行った。広報手段としては、大学の Web ページへの情報掲載、教育委員会への情報発信、twitter など SNS での情報発信などを用いた。また、より詳しい情報を提供するため、専用の Web ページも開設した<sup>#</sup>。この Web ページでは、情報提供とともに写真投稿用ページも併設し、

使用したカメラ機種などの情報なども提供してもらった。なお、参加者を増やすためカメラの機種には拘らず画像を提供してもらった。

## 4. 結果

### (1) 画像収集状況

月食当日の三重県は曇天であり、伊勢以南では月を見ることはできなかった。伊勢以北でも時折雲間から月が見える状況であった。そのような状況の中、結果として 553 枚の月食画像を収集することができた。収集画像の内訳を表 1 に示す。収集した画像の内、解析に利用できた画像は 122 枚であった。

表 1: 収集した画像の内訳

都市名	収集枚数		解析可能枚数	
	一眼	コンデジ	一眼	コンデジ
員弁郡	1	0	0	0
桑名市	2	5	0	3
亀山市	6	0	3	0
津市	199	59	67	14
伊賀市	4	95	3	2
名張市	9	0	5	0
松阪市	3	0	1	0
伊勢市	170	0	24	0
小計	394	159	104	19
合計	553		122	

<sup>†</sup>様々な OS に応じた版をウェブ・ページから無料でダウンロードできる (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>)

<sup>‡</sup>フリーソフトとして以下のページからダウンロードできる (<http://www.aerith.net/misao/pixy/index-j.html>)

<sup>#</sup><http://eclipse2014mie.web.fc2.com/>

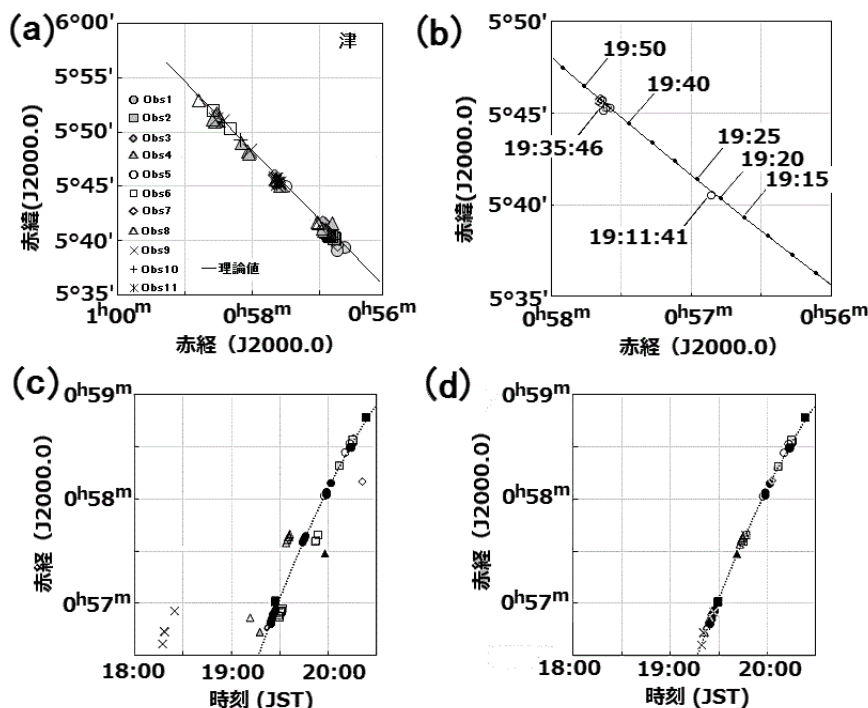


図 2 : a)津市での月位置算出結果, b)時刻の比較, c)時刻補正前の赤経の経時変化, d)時刻補正後の赤経変化

## (2) 月中心の推定位置と時刻補正

月中心位置の算出結果の 1 例を図 2a に示す。図中のシンボルの違いは撮影者の違いを表しており、特に×と+はコンパクトデジカメによるものである。図の右下から左上にかけて月中心位置の推定結果が並んでいるが、これは当日の天候不良により 20 : 00 での同時撮影が難しかったことから、様々な撮影時刻での画像が混在しているためである。図中の実線は、ステラナビゲータ(ver.10)から求めた津市役所位置での月位置の時間変化を表したものである。測定結果が基本的にこの線に沿って分布していることは、今回採用した月位置の算出方法が妥当であったことの傍証となる。

しかしながら、月画像の撮影時刻が異なっているままでは地図作成に用いることはできない。さらに収集した画像の中には、画像取得時刻がずれている可能性があるものが多数あることがわかった。図 2b に 1 例として津市のケースを挙げる。図中の実線はステラナビゲータにより求めた津市における月位置の時間変化を示したものであり、5 分毎の位置を点で示している。月食画像から求めた月位置は、実線に沿って分布しているものの、例えば、画像取得時刻が 19:11:41 となっている画像は、実線上

は 19 : 20 と 19 : 25 の間に位置しており、画像に記録されている撮影時刻とステラナビゲータにより求めた予測位置の時刻にずれがあることがわかる。このように、撮影時刻およびカメラの時刻設定の両方がずれている可能性があるため、視差算出のためには時刻補正が不可欠となる。時刻補正は次のような手順で行った。

①まず、画像に記録されている時刻と画像から算出した月位置の関係をグラフにする。図 2c は撮影時刻と赤経、図中の点線は、時刻が正確であることがわかっている画像から求めた月位置に対し、2 次式での最小二乗フィットを行った結果を表している。点線から外れている撮影者の結果も、時刻方向にずれているものの、時刻に対する変化率は点線に沿っている。すなわち、測定結果を時刻方向に平行移動させることで、点線と重ねることができそうである。そこで、横軸の平行移動量がカメラの設定時刻のずれであると判断し、時刻のずれ量を算出した。

時刻補正後の月位置の時間変化を図 2d に示す。撮影者によらず同じ系列上に測定値が分布するように補正ができていることがわかる。この時刻補正が終了した段階で、改めて時刻に対する 2 次式での最小二乗フィットを行い、求めた 2 次式を用いて 20:00 における月位置の推定を行った。

最終的に求めた結果を表 2 に示す. 計算値はステラナビゲータから求めた値を示している. 最終的な角度差を見ると, 今回目標とした 2.7" を達成できたのは津市のみであった. 亀山, 名張のケースは目標値に近いものの, 松阪, 伊賀, 伊勢は目標から大きく外れている. ただし, 松阪, 伊賀のケースは画像枚数が 1 枚および 5 枚と少なかったことが理由と考えられる. この点については考察で検討する.

表 2 : 20 時での月中心位置の算出結果

都市		算出値	計算値	残差	角度差
津	$\alpha$	0 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 04.5 <sup>s</sup>	0 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 04.4 <sup>s</sup>	+1.5"	1.6"
	$\delta$	05°48'27.5"	05°48'28.0"	-0.5"	
亀山	$\alpha$	0 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 04.0 <sup>s</sup>	0 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 04.3 <sup>s</sup>	-4.5"	4.5"
	$\delta$	05°48'20.3"	05°48'20.0"	+0.3"	
松阪	$\alpha$	0 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 03.1 <sup>s</sup>	0 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 04.6 <sup>s</sup>	-22"	22"
	$\delta$	05°48'37.4"	05°48'35.0"	+2.4"	
伊賀	$\alpha$	0 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 04.4 <sup>s</sup>	0 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 05.0 <sup>s</sup>	-9"	9"
	$\delta$	05°48'23.8"	05°48'24.0"	-0.2"	
名張	$\alpha$	0 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 05.7 <sup>s</sup>	0 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 05.5 <sup>s</sup>	+3.0"	3.1"
	$\delta$	05°48'31.7"	05°48'31.0"	+0.7"	
伊勢	$\alpha$	0 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 03.6 <sup>s</sup>	0 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 04.3 <sup>s</sup>	-11"	11"
	$\delta$	05°48'40.7"	05°48'40.0"	+0.7"	

\*  $\alpha$  : 赤経,  $\delta$  : 赤緯

## (2) 地図との比較

次に, 視差の算出結果と地図との比較を行う. 既存の地図との比較を行う場合, 基準時刻として設定した 20 : 00 に月は天頂とは異なる場所にあったため, 図 1a で示した三重県地図をそのまま測定結果と比較することはできない. 日本標準時 20 : 00 における三重県での月の方位角および高度は, それぞれ真北から東回りに 105°, 地平線から 30°である. 月から見ると, 三重県は東南東方向から斜めに見下ろす状態になるため, 東南東~西北西方向の縮尺が 1/2 ( $=\sin 30^\circ$ ) となり, 天球上には点対称にこの配置が反映される. さらに, 月の南中時刻は 23 : 50 であり, 20 : 00 の時点では時角が-3 時間 50 分となるが, これは月中心を通る赤経線が子午線に対し 57.5°傾いていることを示している. 以上を考慮した地図と

表 2 の値を比較した結果が図 3 である. 天球では赤経は東に向かって値が大きくなるため, 横軸は軸を反転し, 地上から天球を見上げた場合と一致するように表示している. また, 津市役所の位置とステラナビゲータにより求めた津市での月位置が合致するようにしている. 図 3 より, 目標とした 2.7" の精度を達成できなかった都市もあるが, 6 都市の内の 3 都市は, 月食画像から求めた都市位置が市域の範囲に収まっていることがわかる. また表 2 でも示されているが, ずれが大きい伊賀, 松阪, 伊勢の 3 市についても赤緯方向のずれは小さいことがわかる.

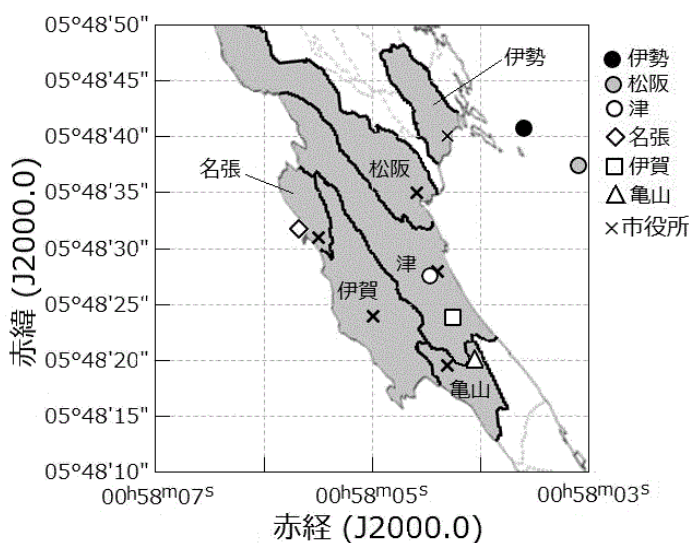


図 3 : 算出した月中心位置と地図との比較

## 5. 考察

上記 4 (2) で示したように, 今回の測定では目標とした視差決定精度を達成できた都市は津市のみであった. 津市と他都市の最も大きな違いは, 解析に利用できた画像枚数である. そこで画像枚数が視差推定精度に及ぼす効果を検証する.

図 4 は横軸に各都市で収集した画像枚数, 縦軸に表 2 で示した月位置の差を示したものである. 中心極限定理によれば, 画像 1 枚あたりの位置算出精度を  $\omega$  とすれば,  $n$  枚の画像から得られる推定精度  $\omega_0$  は次式(1)のようになり, 画像枚数の平方根に反比例して向上する.

$$\omega_0 = \omega / \sqrt{n} \quad (1)$$

図中の点線は式(1)に基づき,  $n^{-1/2}$  での最小二乗フィットの結果を表している. 各都市で収集した画像の  $\omega$  は必ずしも同じではないが, 今回得られた結果が基本的には式(1)に従っていることが

わかる。また、今回、松阪や伊賀での位置精度は目標精度 2.7"を達成していなかったが、図 4より、これは画像枚数が少なかったためであることがわかる。加えて、空間分解能 15"とすれば 1都市あたり 30枚以上の画像収集で 2.7"の目標精度を達成できることも読み取れる。

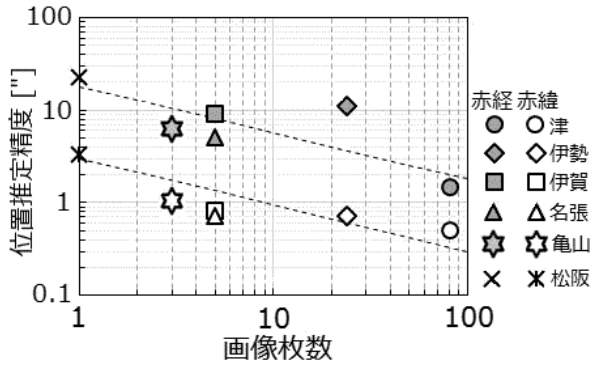


図 4：画像枚数と位置推定精度の関係

それに対し、伊勢での赤経の推定精度 (11") は、画像枚数から予測される精度 (3") に比べ、約 4 倍大きくなっている。一方で、赤緯の位置精度はほぼ予測通りであることから、伊勢の位置精度が予想より大きくなった要因は、画像枚数以外にあると考えられる。図 5 は伊勢で撮影された典型的な月食写真である。よく見ると、明瞭に写っている月の上方に淡く月の輪郭が見え、わずかにぶれた画像であると判断できる。伊勢のケースでは、図 5 で示したような画像が多数見つかった。このぶれ方向は赤経方向に沿っており、月中心位置が系統的に垂直方向にずれた原因の可能性が高い。このぶれ方向はカメラのシャッターを押す方向と定性的に一致している。このため、今後は撮影の際にセルフタイマーを使用すべきとのアナウンスを充実させる必要がある。

## 6. まとめ

月食は特別な機材を使用せずに見ることができる天文現象であるが、デジタルカメラでの月食撮影という能動的活動、また撮影した画像を用いて何かしらの科学的成果を得るという目標を加えることで、幅広い年代層の方に、より関心を持って観察をしてもらえる可能性が高い。国内で見ることができる全ての皆既月食が地図作成に適した条件であるわけではないが、5年に1度程度の頻度で一般市民が参加

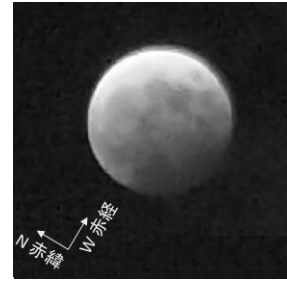


図 5：伊勢で撮影された月食画像例

しやすく地図作成の目的に適した月食が起きる。また、県内には多数の小中高校があり、これらの学校は地域に満遍なく配置されている。したがって、それぞれの県において、県内各地の学校が連携して本手法を用いた視差検出の活動に参加することにより、県内の各地域で満遍なくデータを収集することができ、多地点に対する位置推定が可能となる。今回の試行により、写真撮影の際には時刻合わせと画像のぶれの影響が大きいことが分かったことから、イベントとして実施する際には 1) 事前にカメラの時刻合わせを行っておくことと、2) セルフタイマーの使い方を調べておくこと、3) ピントの手動調整が可能な場合には無限大 (∞) に設定することの 3 点を注意事項としてわかりやすく伝えることが必要である。

なお、本研究の詳細は“地学教育, 69 卷(2), pp.49-72”に掲載されているので、そちらも参照していただきたい。

**謝辞** 本研究は岡三加藤文化振興財団の助成を受けて行われた。また 2014 年 10 月 8 日の皆既月食画像は多くの一般市民の方からご提供いただいた。ご協力いただいた多くの方々に対し、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- Abramoff, M. D, et al.(2004) : Image Processing with ImageJ, Biophotonics International, 11(7), 36-42.
- Lawrence, P.(2004) : The Lunar Parallax Demonstration Project, Sky & Telescope, 108(3), 94-95.
- 石坂他, (2012) : みんなで日食マップをつくろう! ~金環日食限界線共同観測プロジェクト~, 天文教育, 24(4), 6-10.
- 吉田誠一 (1998) : 多様な天体画像から自動的に星の位置・光度を測定し要注意天体を選別するシステムの開発, 早稲田大学大学院理工学研究科修士論文.
- 星空公園,(2011) : 皆既月食時の夜空の明るさ変化を調査, <http://www.kodan.jp/release/111218/release111218.pdf>

## 付録 画像処理の具体的な手順

画像処理は 1) 画像上での月中心位置の推定と、  
2) 月中心位置の赤経・赤緯の算出の 2 種の過程  
がある。本研究で用いた具体的な手順について以  
下に示す。

### 月中心位置の推定 (ImageJ を使用) :

- 1) デジカメで取得された jpeg カラー画像を開く。  
File → Open
  - 2) 開いた画像を 8bit のグレースケールに変換。  
Image → Type → 8bit
  - 3) 画像のネガ・ポジ反転を行う。Edit → Invert
  - 4) 閾値を設定し、画像を 2 値化。  
Image → Adjust → Threshold → 設定 → Apply
  - 5) 月中心位置検出のための条件設定。  
Analyze → Set Measurements  
・ Center of Mass, Fit Ellipse にチェック。
  - 6) 月中心位置および周辺の星の検出を行う。  
Analyze → Analyze Particles  
    - ・ Size : 10-Infinity<sup>†1</sup>
    - ・ Circularity : 0.00-1.00
    - ・ Show : Outlines
    - ・ Display results
    - ・ Exclude on edge
    - ・ Clear results
    - ・ In situ Show
- } チェック
- 7) 検出された天体位置に番号が振られるので、  
月に該当する番号の検出結果を参照する。  
X,Y が月を楕円フィットした際の中心座標。

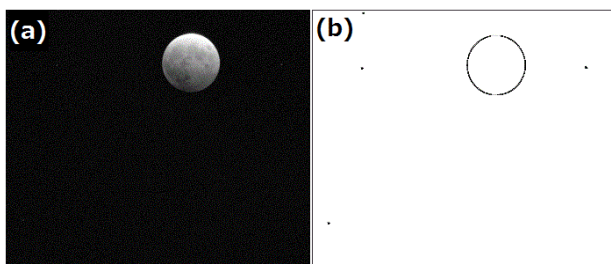


図 A : 月および周囲の星の検出例

### 月中心の赤経・赤緯の算出 (Pixy を利用) :

- a) 月食画像を開き GIMP やペイント等の画像  
編集ソフトを用いて月の領域をマスクする。
- b) ImageJ で求めた月中心位置に相当する画素  
位置にフラグを立てる。  
  - α) 月中心位置に相当する画素の信号をビット  
反転させる。
  - β) ビット反転させる範囲は 1 画素にとどめる。
- c) 上記 b) の作業が終わったら、マスクした画像  
をオリジナル画像とは別名で保存。
- d) Pixy システム 2 を立ち上げる。
- e) 画像解析の開始。  
Examination → Image Examination
- f) 上記 c) で保存した画像を開く。  
Operation → Open Image<sup>†2</sup>
- g) 天体の検出。 Operation → Detect Stars
- h) 検出した天体と星表の比較。  
  - α) 検出した星を選択して左クリックすると  
座標入力用のウィンドウが開く。
  - β) 開いたウィンドウに必要項目を入力する。  
    - ・ Name: 星表番号等の名前 (未入力でも OK)。
    - ・ R.A.: 赤経の値を入力
    - ・ Decl.: 赤緯の値を入力。
    - ・ Mag 等級を入力。今回の目的では入力不要。
- i) 座標入力後、OK をクリックすると User's Catalog,  
Image Info, Photometry Table, Astrometry  
Table の 3 種のウィンドウが開くが、これらの  
ウィンドウは最小化しておく。
- j) 星の座標入力終了後、最小化していた Astro-  
metry Table を開き、"Apply" をクリック。
- k) 以上の作業で、観測した星の位置と星表位置の  
対応がつく。この対応作業で得られた画像  
情報は Image Information に表示される。
- l) 上記 b) でビット反転させた画素も星として検  
出されているので、その画素位置を左クリックす  
ると、その画素位置に相当する赤経、赤緯の値が  
表示される。

<sup>†1</sup> ノイズを検出しないよう 10 画素以上連続して有意な  
信号がある領域を検出する設定。

<sup>†2</sup> 開いた画像の大きさが適切でない場合には、開いた  
画像上で右クリックすると 画像のズームイン・ズー  
ム・アウトができる