

## 投稿

## 月食写真で三重県を描こうプロジェクト

## ～デジカメ画像での微小視差検出の試み～

伊藤信成（三重大学教育学部）、中川友博（三重大学教育学部）

## 1. はじめに

日食・月食などの天文現象は、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、比較的变化が早いので天文・宇宙への興味・関心を喚起する現象として有効である。

2014年10月8日に国内では約3年ぶりの皆既月食があった。この月食は皆既期間が19時25分～20時25分と小中高生が観察しやすい時間帯であり、国立天文台の「皆既月食を観察しよう2014」キャンペーン[1]をはじめ、様々な施設や団体が月食の情報を発信した。三重大学でも地域住民に向けて、何か目的を持った観望会ができないかと検討を行った。2012年の金環日食の際には、多くの一般市民の参加を得て北限界線の共同観測プロジェクトが実施され、大きな成果を挙げた[2]。また、Lunar Parallax Demonstration Projectでは、大西洋を挟んだ広い範囲で同時に皆既月食を撮影し、視差を検出するプロジェクトが行われている[3]。これらの成果を踏まえ、三重県各地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三重県の地図を描くという企画を考えました。

この企画を成功させるためには、県下の様々な地点で、同時に月食写真を撮影する必要があります。写真撮影という能動的要素を加えることで、月食をより詳細に観察してもらうとともに、自分が撮影した画像から科学的結果が出せるという体験を通じて、宇宙への興味・関心を一歩深めてもらうことを目指した。

## 2. 地図作成の原理

視差は天体までの距離算出に利用され、地上に設定する2点の位置は既知として扱われるのが一般的である。今回はこれとは逆に、視差の大きさから2点間の相対位置を求めることを試みる。さらに、複数の地点で同時に視差を測定することにより、各地点間の相対位置を求めることが可能となるため、測定地点の相対位置を紙面上に描けば、それはすなわち地図となる。

ただし、視差の大きさは基線長に比例するため、2点間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1は三重県の形と主要都市の位置を示したものである。三重県は南北に長い県であり、北端に位置する桑名市と南端に位置する熊野市の間の直線距離は約160kmである。地球一月間距離を $3.8 \times 10^8 \text{ km}$ 、地球上での基線長を160kmとした場合の視差を計算すると約 $1.4'$ となる。

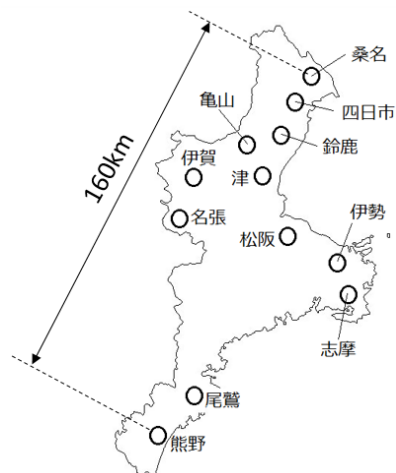


図1 三重県の主要都市の位置関係

一方で月の視直径は  $33'$  である。図 2 は桑名と熊野で同時撮影した月画像を重ね合わせた場合のシミュレーション画像である。視差によって月の位置がわずかにずれていることがわかる。しかし、三重県内での最長基線をとった場合でも、月の視直径に比べて視差は小さく、このままでは地図を描くことはできない。そこで、次善の策として、月全体ではなく月の中心位置を用いることとした。中心は点であり大きさが無いので、わずかな視差の違いも検出可能と考えた。

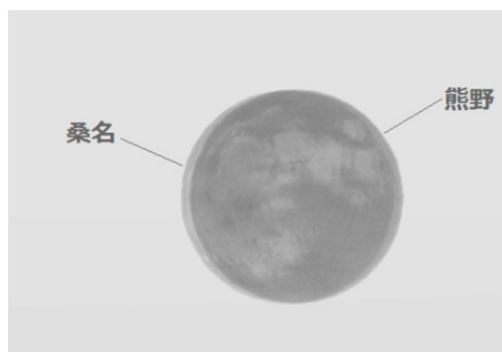


図 2 桑名と熊野で同時に月を撮影した場合の視差のシミュレーション結果

図 1 で示した都市の位置より、各都市間での月の視差を計算すると、例えば津—松阪間では  $7.7''$ 、桑名—四日市間では  $7.0''$  となる。したがって、都市の位置の違いを検出し地図を作成するためには、撮影地点の相対位置を  $5''$  程度で決定する必要がある。視差の検出にはデジタルカメラで撮影した月食の画像を用いるが、一般的なデジタル一眼レフカメラの場合、レンズの焦点距離を  $200\text{mm}$  とすれば 1 画素あたりの空間分解能は約  $4''$  となり、 $5''$  の位置精度は原理的には可能である。

さらに、月は公転運動により天球を 1 分間当たり約  $0.5'$  移動するので、画像撮影時刻が異なれば月の位置も異なってくる。そのため、画像撮影時刻にも制限がかかることになる。前述の位置検出精度 ( $5''$ ) に影響を与えない

よう、その  $1/10$  の位置移動 ( $0.5''$ ) に抑えようとする撮影は県内全域で 1 秒以内に行う必要があり、大きな制約となる。

なお、今回用いた月中心の位置算出原理自体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いため星が写り難いが、皆既月食中は、夜空が暗く [4]、月近傍の星を月とともに写すことが可能となる。また、満月の場合には、後述するように月の輪郭全周を利用して中心位置の推定が行えるため、三日月等の場合に比べ中心位置決定精度が向上する。以上の理由により、皆既月食は視差推定に適した時期と言える。

### 3. 実現可能性の評価

プロジェクトの遂行にあたり、本手法が実施可能かどうかをあらかじめ検証を行った。

#### 3.1 月中心位置の推定方法と事前評価

デジタルカメラ画像上での月中心の算出には画像解析ソフトの ImageJ [5] および Pixy [6] を用いた。具体的な手順を以下に示す。

##### A. ImageJ を用いた作業

1. 月食画像の二値化
2. 二値化した月の境界を楕円フィット
3. フィットした楕円中心を算出

##### B. Pixy を用いた作業

1. 未二値化の画像の月部分をマスク
2. 星の検出 (Detect star)
3. 検出した星とガイド星カタログとのマッチング (matching)
4. マッチング結果を用いて A-3 で求めた月中心座標の算出

視差の推定精度を評価するため、過去に撮影された皆既月食画像に対し、上記手法を適用した。評価に用いた画像は 2010 年 12 月 21 日および 2011 年 12 月 10 日の皆既月食時に取得された画像で、ネットを介して取得したものである。画像の詳細を表 1 に示す。

表 1 視差推定評価用画像の詳細

	2010.12.21*	2011.12.10**
撮影場所	八戸市 N 40.5194° E141.5117°	洲本市 N 34.3036° E134.9314°
撮影時刻	21:41	23:34
レンズ	f500mm, F/6.7	f520mm, F/8
露出時間	15sec	1/4 sec
ISO	200	1600

\*: 田端健氏 (本会東北支部) からの写真提供  
 \*\*: [http://www.jpcoast.com/tag/1256\\_1.html](http://www.jpcoast.com/tag/1256_1.html)

2例の結果とステラナビゲータ (ver.8) による月面中心位置の計算結果の比較を表2に示す。2枚の画像で残差は、赤経・赤緯とも3"以下となっており、都市の判別に必要な5"の条件を満たしていることがわかる。さらに同一都市で独立して取得した画像枚数が増えれば位置推定精度の向上が期待できる。

表 2 月中心位置の推定位置と理論値の比較

八戸	赤経 (J2000.0)	推定値	05h08m10.9s
		ステナビ	05h08m11.1s
	残差		-0.2s (-3")
	赤緯 (J2000.0)	推定値	+22°20'57"
		ステナビ	+22°21'00"
残差		-3"	
洲本	赤経 (J2000.0)	推定値	06h00m48.2s
		ステナビ	06h00m48.2s
	残差		0s (-0")
	赤緯 (J2000.0)	推定値	+23°09'30"
		ステナビ	+23°09'29"
残差		+1"	

### 3.2 位置基準星の有無

視差の検出の際には、背景に位置の基準となる適当な明るさの恒星があるかどうか重要となる。図3に2014年10月8日20時(JST)における月と恒星の位置関係を示す。

月の近傍に天王星が位置しているが、それ以外にも6等台の星が2星あることがわかる。表1で示した画像では、8.5等までの星が写っていたことから、デジタル一眼レフカメラであれば3星程度の星が写り、位置基準星として利用できる。また、天王星は惑星であるので厳密には天球上を移動するが、短時間では位置変化は無視できるので、今回は位置基準として用いることができる。

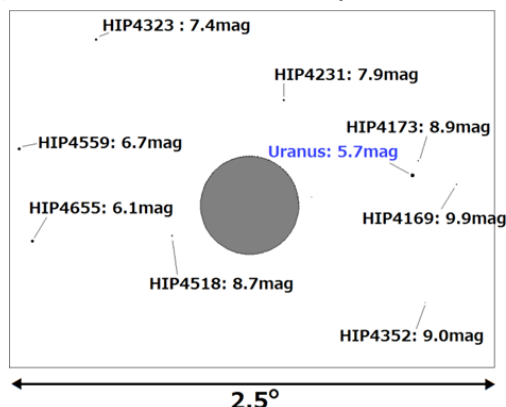


図 3 10月8日20時(JST)の月と星の位置

### 4. 情報の発信

これまでの検討結果から、月の視差を高精度で検出することが可能と考え、本プロジェクトへの参加を募るべく、三重県全域に向け広報活動を行った。広報手段としては、大学webサイトへの情報掲載、研究室Twitterでの情報発信、大学広報を通じての報道機関への情報配信、三重県教育委員会への情報発信、および研究室主催の観望会でのチラシ配布(図4)である。より詳しい情報を提供するため、専用のwebサイトも開設した[7]。2章で説明したように撮影時刻の制約は強いが、あまり厳しい制約を課すと参加者への負担が大きいため、20時を基準に±3秒以内での撮影をお願いした。また、可能であれば19時40分と20時20分の計3回の撮影も要請した。

なお、参加者を増やすためにはコンパクトデジカメでの利用が不可避であり、コンパクト

トデジタルカメラでの撮影方法についても検討を行ったが、後述するように必ずしも上手くいかなかったので、詳細は割愛する。

**皆既月食で三重県を描こうプロジェクト!**  
デジタルカメラで皆既月食を撮りませんか?

2014.10.8(水)に**皆既月食**があります。  
この月食は、日本では約3年ぶりとなる皆既月食で、夕方の見やすい時間に始まります。

三重県津市での月食の進行予想(三重県全域でほぼ同じ)

現象	時刻
月の出	17:20
部分月食開始	18:15
皆既月食開始	19:25
食の最大	19:55
皆既月食終了	20:25
部分月食終了	21:35

今回の月食は次の特徴があります。

- ・非常に見やすい時間帯(18~21時)に起きる
- ・皆既の時間帯が比較的長い(60分)

多くの方にこの月食を見てもらいたいと思っていますが、せっかくなので**月食をデジタルカメラで撮ってみませんか?**

図4 プロジェクト周知で配布したチラシ

### 5. 当日の様子と画像収集状況

月食当日の三重県は曇天であり、図1で示した伊勢以南の地域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り、20時に一斉に撮影を行うのは難しかった。

三重大学でも観望会兼撮影会を行った。曇天に関わらず多くの方に参加していただけたが、月を撮影した方すべてから撮影画像を提供していただくことは難しく、今後の活動においては、画像を投稿し易くする仕組みをつくるのが課題となる。

月食後、三重県各地から撮影画像が送られてきた。曇天だったため、雲間から月が見えた瞬間に撮影されたものが多く、残念ながら20時の撮影設定時刻に合わせて撮影されたものはほとんどなかった。収集画像の内訳を表3に示す。結果として550枚が集まった。県南部での観測ができなかったことを考慮すれば、予想以上の収集枚数と言える。しかし、その多くはぶれていたり基準星が写っていませんかったりした画像であり、最終的に基準星が

表3 月食画像の都市別収集枚数

都市名	収集枚数	利用可能枚数
津市	258 (43)	158 (20)
亀山市	6	3
桑名市	5(5)	0
伊賀市	99 (95)	4 (2)
名張市	9	5
員弁郡	1	0
松阪市	2	1
伊勢市	170	31
合計	550	202

※カッコ内はコンパクトデジタルカメラでの枚数

検出でき、位置推定に利用できた画像は202枚にとどまった。

### 6. 解析状況

解析は現在も進行中で最終結果は出ていないが、次回の皆既月食が迫っていることから、現時点でわかったことについて中間報告する。図5は最も利用可能枚数が多かった津市での月中心位置の算出結果を示したものである。図中のシンボルは観測者の違いを表している。5章でも述べたとおり、当日は天候の関係で20時での同時撮影が難しかったことから、様々な時刻で撮影された画像が混在している。そのため、月の公転による天球上での位置変化を反映し、算出位置が図中の左下から右上に向けて分布する結果となっている。図中の点線は理論計算から求めた津市中心部(三重大学所在地)での月の位置変化を表している。測定結果は、基本的にこの線に沿って分布しており、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っている。

なお、理論線から大きく離れた(赤経, 赤緯)  $(0^h55.8^m, +5^{\circ}42')$ 、 $(0^h57.8^m, 5^{\circ}35.3')$ の2領域にいくつかの点が分布しているが、これらの点はコンパクトデジタルカメラで撮影した画像を用いた結果である。

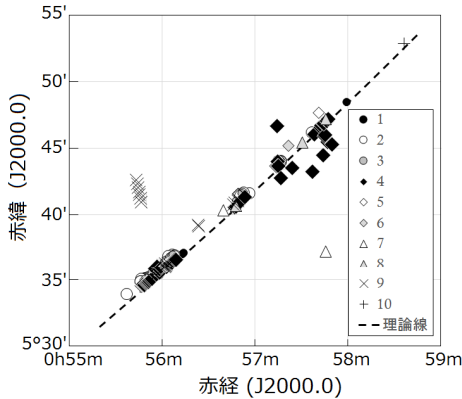


図5 津市内で撮影された画像を用いて算出した月中心位置の推定結果

図5で示した結果は時刻が異なる画像のため、そのままでは都市の位置を求めることはできない。また20時丁度に撮影されたデータのみを用いるのでは画像枚数が少なくなり位置推定精度が低下してしまう。そこで実際の撮影時刻と撮影設定時刻の20時との時間差および月の天球上での移動モデルを用いて、撮影画像毎に算出した位置の補正を行った。補正式を次式(1)、(2)に示す。

$$\alpha_{20h} = \alpha_{obs} + k_{\alpha}(t_{obs} - 20) \dots(1)$$

$$\delta_{20h} = \delta_{obs} + k_{\delta}(t_{obs} - 20) \dots(2)$$

ここで  $k_{\alpha}$ ,  $k_{\delta}$  は理論計算から推定される単位時間あたりの月の移動量である。 $k_{\alpha}$ ,  $k_{\delta}$  の推定に数値モデルを使用するため、モデルに頼らず地図を描くという当初の条件が崩れてしまうが、画像データを有効に利用するための改善の策として本補正を採用することとした。なお、 $k_{\alpha}$ ,  $k_{\delta}$  は定数ではなく時刻とともに変化するため、画像毎に  $k_{\alpha}$ ,  $k_{\delta}$  を決定し、補正を行った。

時刻補正後の月位置を図6に示す。なお、図6ではコンパクトデジカメでのデータは除いてある。図5と比べると図6ではデータが収束していることがわかる。ただし、よく見ると左下から右上にデータが並ぶという傾向

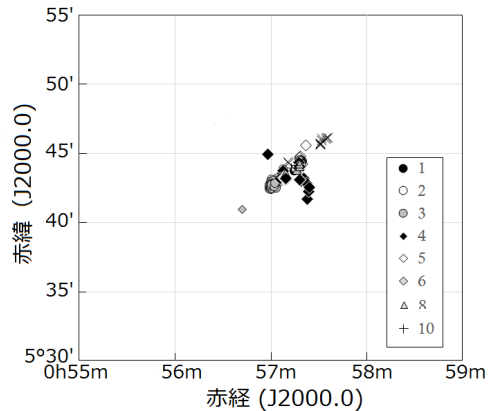


図6 時刻補正後の月推定位置の分布

は完全に取り除かれていないことがわかる。図6の結果を用いて20時における月位置の平均を求めると、次のような値となった。

$$0^h57^m9.9^s, +5^{\circ}43'36''$$

理論値( $0^h57^m16.9^s, +5^{\circ}43'34''$ )との残差は、それぞれ  $-7^s (= -104'')$ ,  $+2''$  となっている。赤緯方向は良い精度で値が求まっているが、赤経方向には大きな残差があることがわかる。これは上述したように、時刻補正後でも図6左下から右上方向へ算出結果が分布する大局的な傾向がとりきれていないことに起因するものと考えられる。現在、この原因を調査中であるが、カメラの時刻と実際の時刻がずれていた可能性が高い。プロジェクトへの参加の広報の際には、カメラの時刻を合わせることを周知したつもりであったが、必ずしも明確に伝わっていなかったようである。

## 7. 2015年4月4日の月食に向けて

今回収集した画像の解析はまだ終了しておらず、いくつかの問題点も明らかになっているが、基本的な方法については適用可能であることが確認されたと考えており、天候が良く多地点で同時撮影ができれば「県」という比較的狭い範囲であっても地図作成が可能であると言える。そこで次回の皆既月食が起き



る 2015 年 4 月 4 日に今回と同様の試みを行いたいと考えている。

次回の皆既月食も皆既が 20 時 54 分～21 時 06 分 (JST) と比較的観察がしやすい時間帯に起きるが、皆既の時間が約 12 分と短い。図 7 は 21 時 (JST) での月近傍の星の配置を表したものである。図 3 に比べ位置基準となる星が少ないが、複数の基準星は確保できそうである。以上より、今回の皆既月食に比べれば実施条件は劣るものの、2015 年 4 月 4 日の皆既月食の際にも、今回と同様の取り組みは可能であると考えられる。月食の日時が年度始めの土曜日であるため、学校での組織的な活動は難しいかもしれないが、例えば県内各地の高校の科学部が連携して同時撮影をするといったことができれば、面白い取り組みになるであろう。

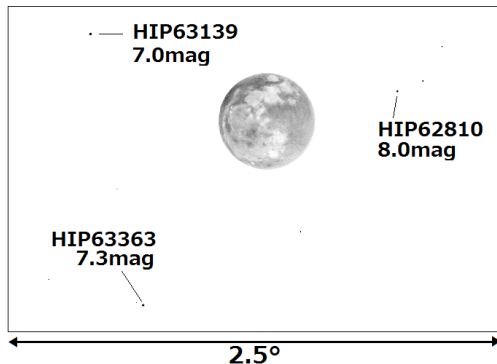


図 7 2015 年 4 月 4 日 21 時 (JST) における月と恒星の位置関係

## 8. まとめ

多くの方が月食に関心を持ち、観望等に積極的に参加してもらえるよう、月食写真から月の視差を検出し、三重県の地図を描くというプロジェクトを計画・実施した。月食当日の三重県は曇天であったが 550 枚の月食画像が集まり、その内の 202 枚が解析に利用できる画像であった。データは現在解析中で、いくつかの問題点も見つかっているが、基本的

な手法は確立できたと考えている。今後解析を進め最終的な地図完成を急ぐとともに、2015 年 4 月 4 日の皆既月食に向け、2 回目のプロジェクト実施の体制を整えていきたい。

**謝辞**：本プロジェクトは岡三加藤文化振興財団の助成を受けて行われました。ここに謝意を表します。

## 文 献

- [1] 国立天文台 (2014), 「皆既月食を観察しよう 2014 キャンペーン」  
<http://naojcamp.nao.ac.jp/phenomena/20141008-lunareclipse/>
- [2] 石坂千春ら(2012)「みんなで日食マップをつくろう! 速報 ～金環日食限界線共同観測プロジェクト～」, 天文教育, **vol.24(No.4)**:6
- [3] Lawrence et al., Lunar Parallax Demonstration Project,  
[http://www.digitalsky.org.uk/lunar\\_parallax.html](http://www.digitalsky.org.uk/lunar_parallax.html)
- [4] 星空公団 (2011), 「皆既月食時の夜空の明るさ変化を調査」,  
<http://www.kodan.jp/?p=release&r=111218>
- [5] Schneider et al. (2012) “NIH Image to ImageJ”. Nature Methods, **9**:671.
- [6] 吉田誠一 (2007), Pixy システム 2,  
<http://www.aerith.net/misao/pixy/index-j.html>
- [7] 月食写真で三重県を描こうプロジェクト HP,  
<http://eclipse2014mie.web.fc2.com/>

伊藤 信成

中川友博