

**投稿****月食写真で三重県を描こうプロジェクト2****～2018.1.31 の皆既月食での取組み～****伊藤信成、加藤明音、中山将大、野呂健吾（三重大学教育学部）****1. はじめに**

月食は特別な機材がなくても観察することができ、比較的変化が速いため、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。月食はカメラで撮影される場合も多いが、皆既月食中は新月期と同程度まで夜空が暗くなるため、月近傍の星を月とともに写すことが可能となる。月と星を同時に写すことができれば視差の検出が可能となるため、これまでにも教育の現場で月の視差検出が試みられてきた[1][2]。距離推定の場合、2 地点での同時撮影が行えれば良い。一方で視差はベクトル量であるので、大きさとともに方向の情報も検出できる。この点に着目し、伊藤・中川（2015）は 2014 年 10 月 8 日の皆既月食の際に多地点間の視差を検出し、そこから三重県の地図を描くという試みを行い、本誌にその進捗を報告している[3]。この時点では時刻補正に課題があり、地図を描くところまでの報告はできなかったが、その後、時刻補正について検討を行い、視差で求めた観測点と地図上での観測点を比較するところまで達することができた[4]。この試行では、視差を可視化することで県の形（今回は三重県）を描くことが可能なことが示されたが、一方で、同一地点での撮影枚数が少なく精度が不十分という課題も残った。

2018 年 1 月 31 日に発生した皆既月食は、皆既時間が 1 時間 17 分と比較的長く、空の高い位置（高度 60° 付近）で見られた。2018 年 1 月には満月が 2 回あり、皆既月食はその 2 回目の満月であり、また地球との距離が 36 万 km と比較的近い距離での月食となつた。さらに月食中は月が褐色に見えることから

Super Blue Blood Moon と称されることになりました[5]、通常にも増して注目を浴びる月食となった。この月食を対象に、多地点間の視差検出により三重県の輪郭を描く試みに再挑戦したので報告する。

**2. データの収集**

2014 年の試行の際には一般市民から撮影画像を提供してもらったが、結果として、同一地点で撮影した画像枚数が少なく、例えば三重県津市内の複数地点で撮影した画像を同一地点での撮影画像と仮定して解析せざるを得なかった。また、カメラの時刻設定の不具合等、一般からの提供故に徹底が難しい点があった。そこで、今回の試行ではプロジェクトのメンバーおよび撮影を依頼した協力者から画像提供を受けることとした。撮影地点は三重県の海岸線に沿った 10 地点を選択したが、天候等の理由により撮影できたのは 7 地点であった。撮影地点を図 1 に示す。大学所在地の津では、大学（津 1）以外に 2ヶ所（津 2：海浜公園、津 3：香良洲町）の計 3ヶ所で

**図 1 月食の撮影地点**

灰色字は撮影できなかつた地点

表 1 月食の撮影条件等

撮影地点	使用カメラ	提供枚数	解析枚数
鈴鹿	SONY NEX5R	25	13
津 1(大学)	NIKON D7200	120	70
津 2	Canon X8i	90	29
津 3	NIKON D90	127	36
伊勢	NIKON D5200	115	56
紀伊長島	NIKON D5300	120	113
熊野	PENTAX K70	13	9

撮影を行った。また、協力者には、皆既開始直後の 22:00 から終了直前の 23:00 までの 1 時間で、可能ならば 30 秒間隔での撮影をお願いした。露出時間は 1 秒で統一した。各地点での撮影条件、撮影枚数等を表 1 に示す。天候等の理由により、提供された画像の中には月の輪郭が不明瞭な画像や星が検出できない画像もあり、それらは解析から外した。

### 3. 解析方法

視差の検出においては同時刻での画像取得が重要になるが、その場合、同時刻での画像は厳密には 1 地点 1 枚しか取得できない。また、シャッターを押すタイミング、時計の同期等、厳密に時刻を一致させることは難しい。そこで、本試行では様々な時刻に撮影した画像から月位置の経時変化を検出し、基準時刻での月位置を算出するという手法を探った。この手法は伊藤・中川 (2017) [4]に準拠するが、若干の変更点もあるので、簡潔に紹介する。解析は①星および月中心の検出、②画像の移動・回転・縮尺の補正、③基準時刻における月位置の算出、という 3 段階からなる。

まず、①では月の周囲に写っている星を検出し、位置基準として用いる。今回は解析可能な全画像に共通して写っていた 4 つの星を位置基準星とした。月と 4 つの星の位置関係を図 2 に示す。当然のことであるが、月の公

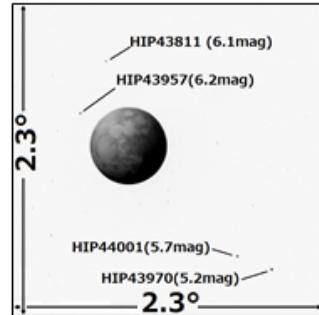


図 2 位置基準とした星と月の位置関係

転により 4 つの星と月の位置関係は時刻とともに変化していく。各画像内での星の検出と位置測定には画像解析ソフト Makali'i[6]を用いた。一方で月の中心位置は Makali'i では算出できない。そこで別の画像解析ソフト ImageJ [7]を用いて画像を単色化し 2 値化 (Threshold) した上で、輪郭を検出し (Find Edges)、その輪郭に対し円の最小二乗フィットを行うことで月中心位置を推定した。円での最小二乗フィットのプログラムは Excel の VBA で自作した。

次に②については、基準となる画像を決め、その画像の位置基準星に一致する様に、その他の画像の平行移動量 ( $\Delta x, \Delta y$ )、回転角 ( $\theta$ )、拡大・縮小率 ( $R$ ) を算出していく。今回は、津 1において 22:15:03 に撮影された画像を基準として用いた。平行移動量、回転角、拡大・縮小率の 5 種のパラメータを求めるには原理的には 2 つの星があれば良いが、精度を上げるために上述したように今回は 4 つの星を用いた。一旦パラメータが求まれば、補正後の月中心位置 ( $x_0, y_0$ ) は次式 (1) で変換できる。

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \cdots (1)$$

なお、伊藤・中川 (2016, 2017) では、基準星の赤経・赤緯を算出して位置を比較していたが、今回はその方式を用いる代わりに式 (1) を用いた変換を行うこととした。これ

は分点変換も含めて各星の視赤経・視赤緯を求めることが煩雑であること、観測点間の相対位置関係を求める場合には赤経・赤緯の絶対値が必ずしも必要ではないことによる。図3aは複数画像での月中心位置の算出結果をそのまま示した例である。月の日周運動に合わせてカメラの位置を変えているため、画像内で様々な位置に月が写っている様子がわかる。一方、図3bは式(1)を用いて位置補正を行った後の月中心位置の変化を示したものである。月の公転運動とともに月の位置変化が1つの系列として現れている。

最後に③で基準時刻における月中心位置を求める。図4a、bは津市における月位置の水平・垂直方向の時間変化の様子を示したものである。図中の点線は2次式での最小二乗フィットの結果を示している。回帰式が求めれば、基準時刻における月位置の算出が可能になる。今回は皆既時間帯の中間となる22:30を基準時刻とした。

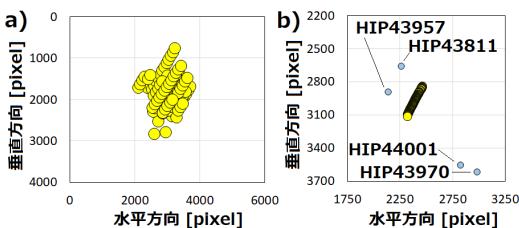


図3 位置補正の効果例

a) 位置補正前、b) 位置補正後

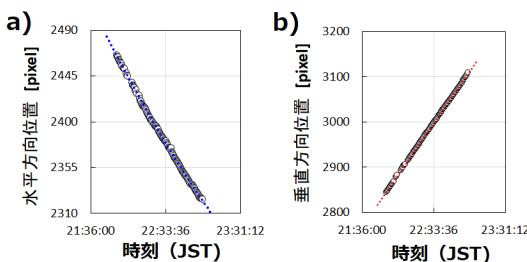
図4 水平・垂直方向の月位置の時間変化例  
a) 水平方向、b) 垂直方向

表2 カメラの空間分解能

観測点	分解能 ["/pixel"]	観測点	分解能 ["/pixel"]
鈴鹿	19.9	伊勢	4.1
津1	5.9	紀伊長島	3.8
津2	14.4	熊野	1.4
津3	17.9		

#### 4. 結 果

まず、上記で示した解析②のプロセスにより、各画像の空間分解能を求めることができたので、その結果を表2に示す。使用したカメラや撮影者の画角設定の違いにより、空間分解能は大きく異なることとなった。

各測定点から求めた基準時刻における月中心位置を図5に示す。なお、上述したように6000×4000の画像フォーマットである基準画像内での位置なので、横軸・縦軸の絶対値に意味はないが、地上で水平においていたカメラで撮影しているので横軸の右側が西、左側が東、上方が天頂方向に相当する。図1に示したように三重県は南北に長い県であり、観測点も海岸線に沿って南北方向に並んでいるが、図5ではばらつきはあるものの東西方向に点が分布しているのがわかる。この理由については後の考察で考える。なお、各点の誤差は最小二乗フィットの精度から評価した。鈴鹿での誤差が多地点に比べ非常に大きいが、これは、鈴鹿での撮影が22:00～22:07の間のみで、基準時刻前の画像しか取得できなかったため、時刻に対し外挿で位置推定を行ったことに依るものである。

月から見た場合、津1-熊野間の月からの視線方向に直交する距離（基線長）は84kmに相当し、そこから予測される視差の大きさは49"となる。一方で図5から津1-熊野の視差の大きさは53±6"となっており、両者は良い一致を示している。

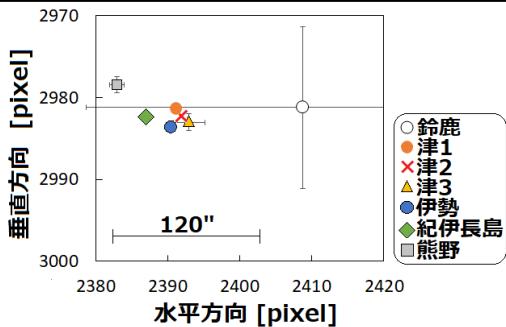


図 5 視差から求めた観測点の相対位置

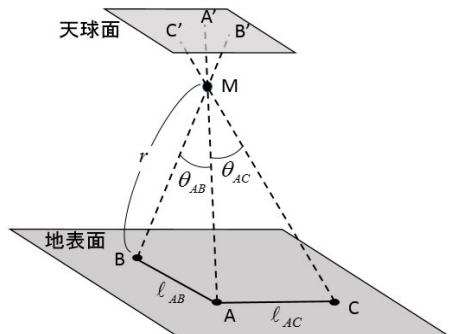


図 6 観測点が天球上に投影される様子

## 5. 考 察

視差は観測点の位置関係が天球上に点対称で投影される。図 6 は 3 地点間での視差の様子を模式的に表したものであるが、多地点間の視差を検出することで、天球上に観測点の相対位置関係を再現することができる。

ただし図 6 は天体 M が天頂に近い場所にあった場合であり、今回の月食において基準時刻における津市での月は方位角  $114^\circ$ 、高度  $56^\circ$  に位置していた（図 7a）。したがって、月から見た場合、三重県は図 7b のようにほぼ東西方向が  $0.56 (= \cos 56^\circ)$  倍に縮んで見えることになり、天球上に投影される観測点位置も同様に歪曲していることになる。

そこで、この図 7b で示した地図と今回の算出結果の比較を行った。撮影点間の相対位置のみであれば問題ないが、地図との比較の際には地図の縮尺を決める必要がある。縮尺を決めるためには、月までの距離を既知とし

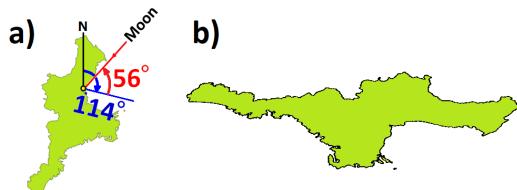
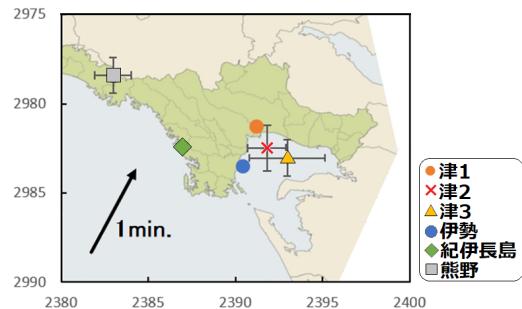
図 7 a) 基準時刻での月の方位角および高度、  
b) 月から三重県を見た場合の見え方

図 8 測定結果と地図との比較

て用いるか、測定で得られた任意の 2 地点の位置を地図と一致させるようにする方法がある。前者には、視差は距離推定に用いる手法であるという天文分野の一般的な見方から外れるのではないかという指摘があり得る。

後者には、そもそも地図を観測に合うよう拡大・縮小するのは本来の目的に反するという指摘があり得る。いずれにしても今回の測定から得られる情報のみでは地図との比較ができないため、今回は月までの測心距離を既知 ( $3.54 \times 10^8$  m) として地図のスケーリングを行った。結果を図 8 に示す。鈴鹿はズレが大きいので地図との比較からは除外した。図中の矢印は 1 分間での月中心の移動量を表している。図 8 より、津 1 は地図とのマッチング基準なので比較から外すとして、伊勢・紀伊長島・熊野の 3 点は地図上の位置と測定からの推定位置が良く一致している。津 2 と津 3 は海上に位置する結果となったが、大局的にみると津 1 近傍には分布しており、極端にずれた結果とはなっていないことがわかる。

さらに地図上の位置と推定点とのズレを測

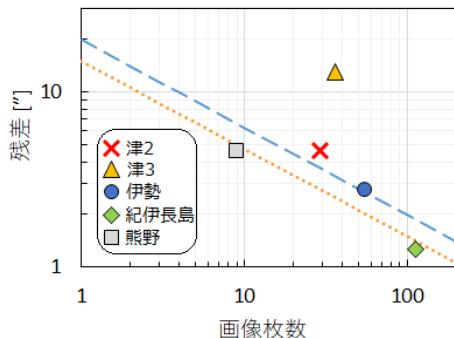


図 9 画像枚数と推定点の残差の関係

定した結果を図 9 に示す。中心極限定理によれば、画像 1 枚あたりの位置精度を  $\varepsilon$  としたとき、 $n$  枚の画像を用いて求めた位置精度  $\omega$  は次式 (2) で表せる。

$$\omega = \varepsilon / \sqrt{n} \quad \cdots (2)$$

ここで  $\varepsilon$  はカメラの空間分解能および星像の大きさで決まる。今回は露出時間 1 秒の固定撮影を基本としたため、露出の間に日周運動により天体は 15" 移動する。そのためカメラの空間分解能が高くても星像サイズは 15" 程度になる[4]。一方で、カメラの空間分解能が 15" より大きい場合には、カメラの空間分解能が  $\varepsilon$  に相当する。図 9 中の点線は式 (2) の  $\varepsilon$  が 15" の場合を、破線は 17.9" の場合を表している。津 3 のケースを除き、ほぼ式 (2) の線上に位置していることがわかる。なお、津 2・熊野での残差 5" は実距離では 9 km に相当する。このことより、画像枚数を増やすことで位置推定精度を上げられることが期待できる。一方、津 3 のケースは式 (2) の予測から大きく外れている。図 10 は津 1 と津 3 において基準として用いた星の光度分布 (Profile) を比較したものである。津 3 では星像の Profile がダブルピークになっているとともに、光度も低いことがわかる。以上より、津 3 はピントが甘かった可能性がある。今後、学校現場等での実践を行う場合には、

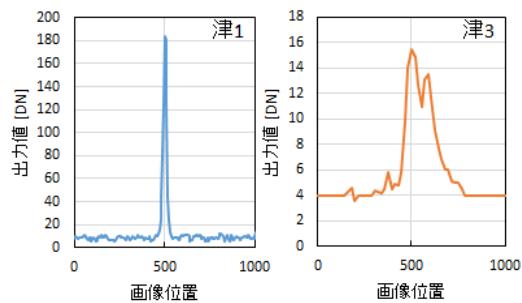


図 10 津 1 と津 3 での星像 Profile の比較

その点も含め事前に撮影練習が必要と考える。

## 5. まとめ

2018 年 1 月 31 日に発生した月食に対し三重県内複数地点で写真を撮影し、取得画像から視差を検出する試みを行った。その結果、天球上に投影された撮影点の相対位置は地図と良い一致を示した。また同一点で 10 枚以上の画像を取得できるのであれば、測定位置を 5" 程度、実距離換算で 9 km の精度で推定できることがわかった。この値は同一県内の隣接都市間の画像から視差が検出できることを示すものである。デジタルカメラでの月食撮影は練習により誰でも可能であり、近隣学校間での連携等、月の視差検出の取組を比較的容易に行えるものと期待できる。

なお、2018 年 6 月の中部支部会において、松井聰氏、高村裕三朗氏、河内礼乃氏からも写真の提供を受けた。これらの画像についても今後解析を行っていく予定である。

## 謝 辞

本取組においては鈴村一将氏、中川友博氏、畠中明利氏、内田陽菜氏、福島彩花氏から画像の提供を受けました。また科学技術振興機構（基盤 C：課題番号 17K00971）の助成を受けています。この場を借りて御礼申し上げます。

## 文 献

- [1] 篠原秀雄（2000）「全国高校生月食観測会」について」，天文教育，Vol. 12 No. 5, 21.
- [2] 篠原秀雄(2002)「月食観測会の取り組み」，天文教育，Vol. 14 No. 4, 10.
- [3] 伊藤信成・中川友博（2015）「月食写真で三重県を描こうプロジェクト」，天文教育，Vol. 27 No. 2, 25.
- [4] 伊藤信成・中川友博（2017）「デジタルカメラを用いた月の微小視差検出の試み」，地学教育, 69, 49.
- [5] 例えば NASA の HP (ホームページ) に紹介されている。  
<https://www.nasa.gov/feature/super-blue-blood-moon-coming-jan-31>
- [6] Horaguchi, H., Furusho, R., Agata, H.,

Paofits WG (2006) ‘FITS Image Analysis Software for Education: Makali‘i’ , ASP Conference Series, 351, 544.

- [7] Abramoff, M. D., Magalhaes, P. J. and Ram, S. J. (2004) ‘Image Processing with ImageJ’ , Biophotonics International, 11(7), 36.



左から伊藤・加藤・中山・野呂

\* \* \* \*