



飛び出す月 Coming Moon 計画 —地平視差を用いた月の立体視観測

半田利弘^{*}， 縣秀彦^{**}， 福島英雄^{**}

* <東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター>

** <国立天文台情報公開センター広報普及室>

* e-mail: handa@mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp

** e-mail: h.agata@nao.ac.jp

** e-mail: hideo.hukushima@nao.ac.jp

天体までの距離は、それぞれ異なっているというのは、近代天文学における基本的概念であるが、必ずしも実感を伴っていない。これは、天体までの実際の距離が多クの人々の想像を越えるほど遠くにあるためである。奥行きを実感してもらうためには立体視写真を示すことは効果的なのではなかろうか。数百 km の基線があれば、地平視差を用いて月の立体視写真を撮影することは可能である。そこで、1999 年 12 月に日本国内数ヶ所で同時観測を行い、このような写真を撮影することができた。今回は、銀塩写真を用いたが、デジタルカメラとインターネットなどを利用することで、この類のイベントは手軽に実行できるものと思われる。天文学への導入のためのイベントの1つとして提案したい。

1. チリでの惑星食

1998 年 11 月、半田は天の川銀河の分子雲サーベイ観測のため、南米チリのヨーロッパ南天天文台を訪れていた。大学院生の澤田剛士さんと2人で、当地に設置してある、東京大学-オンサラ-ESO-チリ大学共同望遠鏡 VST2 での観測で3週間の滞在予定であった。

ある日、夕空を見上げると、月と木星が極めて接近して見えた。澤田さんに聞くと、今日、木星食が起こるのだという。チリは日本から見て地球の裏側である。「日本だと昼間になるから見えないね。」と半田が言うと、「それだけではありません。」と彼が答える。「日本からだとも、そもそも、食にならないですよ。」

そうだった。月って近いんだ。地平視差のために、惑星食や日食は、地球上でも特定の地域でしか観測できないのだ。そういえば、地平視差って、

どれくらい離れたら、どれくらい違って見えるんだろう。ふと始めた計算。そして、これが今回の発想のきっかけとなった。

2. 宇宙の奥行き

天体は天球に貼付いたものではなく、それぞれ、異なった距離にある。これは近代天文学の常識である。惑星探査機が飛ぶ現在、このことは小学生でも知っていることだ。しかし、毎日、夜空を見上げてみて、いったい、どれほどの実感をもって認識できるのだろうか。

「文献からの数値の引用を避け、実証的に天文学の内容を伝えようとする」と、地球から宇宙へ飛び出す第1歩がなかなか難しいんですよ。」天文教育活動の一つである JAHOU^{*}を通じて知り合った、慶応高校の松本直記さんから、こんな話を聞いていたこともあった。

さっそく行ってみた計算結果では、600km 離

れた2地点での地平視差の違いは、およそ5分角。つまり、月自体の大きさの1/6ほどもずれて見えるわけだ。600kmといえば、東京-岡山の距離である。日本国内だけを考えたって、もっと離すことは可能だ。それならば、国内2地点で見た月の位置は明確にずれて見えるに違いない。そして、その2地点の画像を比べれば、月が飛び出して見える写真、月の立体視写真ができるに違いない。「飛び出す月 Coming Moon」という名前を付けて、検討を始めてみた。映画の宣伝によくある、「近日公開 Coming Soon」からモジったタイトルだ。

多地点から見た画像を集めることならば、半田には、1997年にシベリアで起きた皆既日食に伴う部分食での経験があった。尾久土正己委員長を中心とする「Live!Eclipse97 実行委員会」が1997年3月に行った、このイベント²⁾は、皆既日食が起きたモンゴルとシベリアの他、日本各地からの部分食の画像を1ヶ所に集め、インターネットを通じてリアルタイム中継することで、日食を地上の1点から見るものではなく、地球全体で起きている現象として捉えることができるという画期的なものであった。

その成功に基づき、日食のインターネット中継は、その後も継続して行われ、1999年にはヨーロッパで起きた皆既日食を9地点にわたり順次中継することにも成功している。1997年の時には、半田は実行委員会に加わっていたので、多地点から画像を集めることの苦勞に対する抵抗が少なかった。もっとも、これはLive!Eclipseで実作業を行った方々の苦勞を過小評価していただけたことで、今回は、結構苦勞したのだが、それは後でわかった話。

3. 背景の事情

こうして基本的な発想はまとまったのだが、ひとつ大きな考え忘れがあることに気付いた。月が地平視差でズレて見えるというが、さて、何に対してだろうか。答えは自明である。月より遥かに遠方の「背景」に対してなのである。背景となるのは、もちろん、恒星である。それも1個や2個ではダメだろう。半田には天体写真撮影の経験がないのだが、普通のカメラで短時間露光しても暗い星までは写らない程度のことは見当がついていた。いったい、月の周りには何等の星が何個くらい見えるのだろうか。

1 恒星月は27.32日。したがって、月が恒星に対して移動する速度は、0.55"/secである。30秒露光で、月は0.27'移動する。5'の視差を見ようというのだから、この程度の露光時間が限度であろう。

一方、1時間で月が0.55度動くから、月の周囲1度を撮影したとすると、1時間で月の周囲1.55平方度が掃かれることになる。全天で3等星は190個、6等星は5600個あるから、月の周囲1度に恒星1個が入る確率は、3等星なら6日に1回、6等星なら5時間に1回程度になるはずである。全天に一樣に星が散らばっているならば、なかなか思惑どおりにはならないという結論であった。そこで、この話は、一旦、お蔵入りになってしまった。

4. 復活の日

下って、1999年春。金星と木星とが接近して見える日がやってきた。この天象現象をきっかけに、JAHOUのメールグループは、惑星を含む星野撮像の話題で盛り上がった。その中で、半田が月の地平視差の話を持ち出したのである。そのやり取りを見ていた理化学研究所の戎崎俊一さんが、「とに

*JAHOUとは、米国で行われているHands-On-Universeという教育プログラムの理念に賛同し、その活動を日本にも適用し、独自の貢献もしようというボランティア団体で、理化学研究所の戎崎俊一さんを中心として活発な活動を展開している。天体観測データを直接、高校生に提供し、実際の研究の一端を担ってもらうことで、研究の進歩、科学的方法論の体得、人類の進歩への意味のある貢献感を同時に達成できるというカリキュラムである。詳しくは、科学1997年9月号の戎崎の記事¹⁾を参照のこと。

かく、やってみたらいいじゃんか」とけしかけてくれた。そのひとことから、改めて、実行方法を考えてみるうちにあることに気づいた。最初は、Live!Eclipse のイメージがあったため、CCD カメラで撮像し、インターネットを通じてリアルタイムで画像交換することを考えていたのだが、良く考えてみれば、既存の銀塩写真でだって構わないのである。これならば、画像サーバーを用意するなどといった、大掛かりなことをしなくても比較的気軽に実行できそうだ。星と月さえ写れば。

この当時、半田の所属する東京大学天文学教育研究センターは国立天文台内にあった。半田の部屋は3階で、縣や福島の情報普及室は2階である。縣と半田、それに、たまたま来台していた長野工業高等専門学校の大西浩二さんも交えて、Coming Moon の話をしてみた。やはり、月と星野を同時に撮影するのは困難だろうという話になった。

しかし、大西さんが解決策を示してくれた。新月前後の月ならば、欠けている部分が地球照で淡く光っているはずである。この輝度ならば、星野と同時に撮影することも充分可能であると。実際の空では、星の分布は一樣ではない。天の川に集中しているのだから、月が天の川の近くにいる時を選べば、先ほどの見積もりよりもずっとよい結果になるはずである。この調査には縣があたった。そして、丁度、11月頃、新月直後の月が天の川に差し掛かる時が、比較的多数の星と月とが同時に撮影できるチャンスであることが判明したのだ。

撮影に適した月齢、露光時間の見当をつけるために、まず、三鷹で試験撮影してみることにした。半田や縣だけでは天体写真の撮影は心許ないというわけで、この時点で話を知った、福島が撮影とその後の処理について担当することになった。

試験撮影の結果、表1のような仕様で撮影するとよいことがわかった。さらに、この条件で時間において撮影した2枚の印画を比べてみると、月が



図1：今回のキャンペーンに参加した人たちの観測場所の分布。同時観測の点では、南北に並んだほうが望ましいと考えたが、実際には、このように、どちらかという東西に並んだ分布となっている。結局、もっとも距離が離れた2地点での画像が、同時性・天候条件の両面から最適な画像の組となった。

飛び出して見えることも確認された。撮影時の間に月が天球上を移動したため、擬似的に地平視差と同じ効果が現れたのである。

折り良く、九州大学での日本天文学会年会が間近に迫っていた。天文学会の年会といえば全国各地から天文研究者が集まってくる。そこで、会場で撮影協力を依頼することにした。さらに、JA-HOUのメールグループを通じて、広く協力者を募集することにし、こうして、全国に散らばるように撮影者を集めることができた。撮影日も12月13日と決定。参加者には試験撮影に基づいた撮影の仕様を電子メールで配布する。最終的に参加してくれたのは、表2の通り、日本の天文関係者の分布は西高東低で西日本の方が多い。今回も参加者は関東より西に限られてしまった(図1)。

表 1 : 標準として提示した撮影の仕様

撮影時刻	1999年12月13日 18時20分00秒 18時25分00秒 18時30分00秒 18時35分00秒
月齢	5.4 (3-6で可能)
使用レンズ	f = 300mm または、それとほぼ同等 (背景の恒星がより密集している11月上旬ならばf = 400mmでも可だった)
使用フィルム	35mm カラーネガ, ISO 400
適正露光時間の目安	4-8秒 (F = 8の場合)
追尾	赤道儀によるガイド

撮影対象が新月直後の月ということは、夕刻の薄明直後に撮影しなければ没してしまう。しかし、あまり早いと空が明るくて背景となる星が写らない。このため撮影可能な時間は、それほど長くない。公転運動で月が動いてしまわないようにするために、撮影は全地点で同時に行わなければならない。ところが、日本は関東地方を境に、東北方面は南北に伸びているが、東海道方面は東西に伸びている。日没の時刻は関東と岡山では相当に異なる。縣が調べたところ、現実的なチャンスは30分間ほどしかないことがわかった。同時撮影を逃してしまわないように、18時20分から18時35分まで5分ごとに4回の枠を設定した。妥当な露光時間が正確にはわからないので、F8の場合の4秒を基準に、全部で数段階程度の露光時間での撮影をなるべく手早く行ってもらうことにした。撮影後の調査では、1/4秒から30秒までの露光時間で行われていたが、今回は4秒から8秒が妥当だったようだ。これら具体的な撮影仕様の決定は縣が行った。後は好天を祈るばかりである。

5. 撮影成功

撮影の後、データを収集することになった。当初、印画紙に焼いたものを集めようとしたのだが、実際に三鷹の撮影分を見ると、それでは星が判別しにくいことが判明し、現像したネガフィルム自体を送ってもらうことにした。各地での撮影仕様は

表3の通りである。

レンズの焦点距離を合せたとはいえ、完全に一致させることはできなかったし、実際の撮影の条件が微妙に異なるので、フィルム面上での像の大きさは完全には一致しない。実感的にしようとカラーフィルムを使用したけど、色再現性が微妙に異なり、2枚を直接比べると、かなりの相違が見られた。

そこで、デジタル画像処理の助けを借りることとした。これは福島が担当した。まず、集まったフィルムから、撮影時刻と画質とがなるべく一致している組を取りだし、フィルムスキャナーでデジタル化した。使用したスキャナーはキヤノンのCanoScan FS2710。これは、2710dpiという高級機であるが、もう少し安価な装置でも実用上は問題なかろう。画像はRGB各色16bitという最高精度のデータでTIFF形式で保存した。

2つの画像の違いが視差以外、なるべく無いようにするのは、抵抗なく両眼で立体視できるために必要な処理である。今回は、アドビ社製フォトタッチソフト"Photoshop"を用いて、像サイズ、フレーム方向、色調の調整を行った。

撮影仕様として、なるべく同じ焦点距離のレンズを使用することにはなっていたが、それでもレンズごとに数パーセントの違いがあるため、幕面での像サイズは完全には一致しない。また、カメラを天球に対して完全に同じ向きにして撮影したわけではないので、回転して向きを揃える必要もある。こ

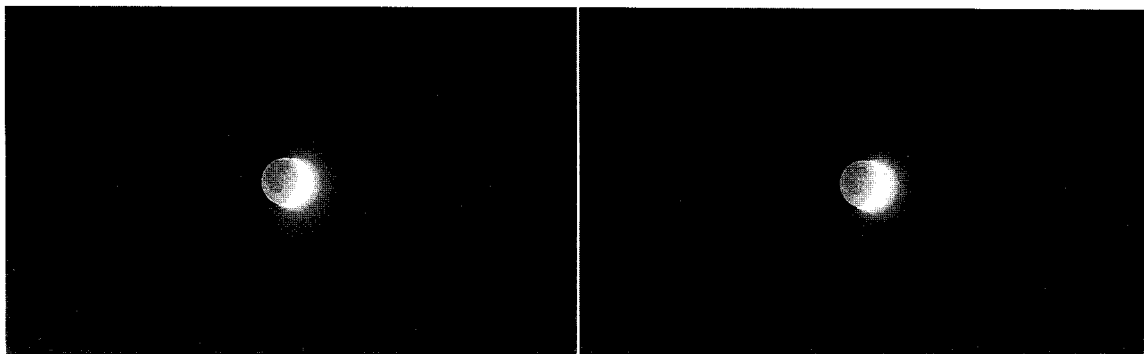


図2：今回のキャンペーンで、最終的に得られた月の「立体」写真。撮影時刻は18時35分10秒。左が岡山県備前市で4秒露光で畠浩二が撮影したもの、右が群馬県立ぐんま天文台で8秒露光で田口光が撮影したもの。北が上にしてあるので交差法（左目で右の画像を、右目で左の画像を見る方法）で見ると、背景となる数個の恒星に対して、月が周囲の恒星より手前に飛び出して見えるはず。（表紙2に拡大図あり）

れには月の東西に写っていた2個の明るい恒星の座標を基準とした。

最終的な画像が一般の人に与える印象を重視したため撮影はカラーで行っている。その色調の調整も重要である。フィルムの特性の違いなどによる色の違いがなるべく目立たなくなるように、画面上で見比べながら、明るさ・コントラスト調整、色調調整、ガンマ特性変更などを繰り返しながら、最終的な画像を得た。

思わぬ大敵は、レンズで生じたハレーションであ

った。地球照に合わせた写真なので、恒星と月の欠けた部分とは、ほどよい露光で写っているのだが、月の光っている部分は完全に露出オーバーになる。この光がレンズ内で反射してゴーストを生じてしまっていたのだ。また、写野の一部に薄雲が写っている場合もあった。結局、今回は、この問題も画像処理で解決することにした。ゴーストが月や星にかかっていないものを選び、背景の何も写っていない空の部分を用いて、ゴーストや薄雲を消去した。修正部分が目立たなくなるように輪郭はぼかして

表2：飛び出す月、撮影成功者と撮影場所（順不同敬称略）

氏名(所属)	撮影場所
橋本 修, 田口 光 (ぐんま天文台)	群馬県高山村ぐんま天文台 138° 58' 38" E, 36° 35' 39" N
原 正 (川越初雁高)	川越市新富町 139° 29.2' E, 35° 54.5' N
川井和彦 (理化学研究所)	和光市理化学研究所 139° 36' 44" E, 35° 46' 28" N
五百蔵雅之, 鈴木麻乃 (大阪教育大学)	柏原市大阪教育大学 135° 39' 07" E, 34° 32' 53" N, 高度 156 m
尾林彩乃, 時政典孝 (西はりま天文台)	兵庫県西はりま天文台 134° 20' 19" E, 35° 01' 21" N
畠 浩二 (岡山商大附属高)	備前市笹尾山 134° 11' 27" E, 34° 43' 35" N, 高度 200 m

表 3：各地での撮影仕様

群馬 (橋本)	フジ ISO400 ニコン FM-2, 300ED F5.6
群馬 (田口)	フジ ISO400 ミノルタ α 5xi, 300F8
川越	フジカラースーパー 400 70-300mm ズーム望遠側
和光	フジ 400 ニコン FM2, ニコン ED300mmF4 F5.6
柏原 (五百蔵)	フジスーパー G 400 300mm F = 4.5
柏原 (鈴木)	フジスーパー G 400 シグマ 100-300mm ズーム F = 4.5-6.7
西はりま	フジクローム プロビア 400 シグマ 1:28, f = 300mm F = 4
備前	フジアステリア 400 ニコン FM, ニッコール 300mm

ある。例えば、群馬天文台の画像は薄雲を、岡山県備前市の画像はゴーストを、この処理で取り除いた。

最後に、画面上での恒星の位置を一致させ、どちらの画面でも月がほぼ中央に来るように、同じサイズにトリミングした。

こうして出来上がったベストの組が図 2 (=表紙 2) に示した写真である。撮影時刻は 18 時 35 分 10 秒。左が岡山県備前市で 4 秒露光で撮影したもの、右が群馬県立ぐんま天文台で 8 秒露光で撮影したものである。北が上にしてあるので交差法(左目で右の画像を、右目で左の画像を見る方法)で見ると、月が周囲の恒星より手前に飛び出していることがわかるはずだが、いかがだろうか。写野には 2 つの明るい恒星のほか、暗めの恒星が 7 つ写っているので、それらが作るパターンと比較してみたい。

2 つの撮影地点の距離はおよそ 500km。両眼の間隔を 10cm とすると、地球から 38 万 km 離れた月は、自分から 80cm ほどの位置にあるように見えるはずなのだが。

6. 解析と今後

撮影した 2 枚の写真を元に、月の視差を測ってみると約 3 分。観測点間の距離はおよそ 500km なので、月までの距離を求めてみると 57 万 km とな

った。視差の測定に際しては、なるべくお手軽な測定で見積もってみようということで、画像に物差しを当てて測定してみた。ハレーションによる月の直径の不正確さや、月の視直径を 30 分と仮定して測定したので、誤差はかなり大きい。2 地点間の距離は 1800 万分の 1 の日本地図を物差しで測って求めたが、これは緯度・経度から地球の半径を引用して求めた距離と、ほとんど違いはなかった。

デジタル画像になっているので画像処理ソフトを利用した位置測定を行ったり、月を撮影したのと同じの機材で大きさや距離がわかっているものを撮影し、それを用いて角度スケールの較正を行えば、精度も向上するはずだ。各観測地での機材の仕様をそろえ、同時撮影の時刻精度を上げれば、より精度が高い値を求めることも可能であろう。多数の組で相互比較するのも面白いと思われる。

今後、同じような撮影を行うためにはゴースト対策が重要である。内部反射が少ないレンズ系を選んで撮影に用いるようにする必要がある。色再現性については、同一ブランドのフィルムを用い、全部を同じラボで現像に出すことで、今回よりも生データでの一致を向上させることが可能であろう。デジタル画像処理でかなりの修正はできるが、あまり、それをやりすぎると、実際に撮影したという意味が失われてしまう。

群馬と岡山で、この程度の視差が得られるとい



うことは、北海道から沖縄まで広がっている我が国だけでも、何組もの「立体写真」を撮影することが可能であるということである。月齢の若い月が天の川付近に見えるという时期的制限があることを考えると、全国一斉にキャンペーンを張るのもよいだろう。また、同一時刻撮影という厳しい条件で全体を組織する困難を考えるならば、2ヶ所だけで示し合せて撮影するという手軽に実行した方が良いかも知れない。

最初に述べたように、このアイデアは、もともと、インターネットで接続して、リアルタイムで画像交換をしようというものであった。これならば「同時観測」でタイミングを合わせる苦労は少ない。普通の35mmフィルムのカメラで撮影できたのであるから、積分時間が調節できるCCDカメラでも十分撮影可能だろう。

このような画像が、小中学生にどのような印象でうけとられるのか。これが次の段階である。幸い、半田と縣は、科学技術館「ユニバース」³⁾の司会を務めることもあるので、その場をかりて、反応を見てみたいと考えている。国立天文台・東京大学理学系研究科附属天文学教育研究センターの一般公開日にも展示してみたい。

さらに、メールグループでの話題の際に、ぐんま天文台の浜根寿彦さんと、金星での地平視差を同様に測定できないかの検討を行ったことがある。日本-オーストラリアで同時観測をすれば、基線長さ7300kmほど。金星が太陽から最大離角の時、15秒になるので、視野を広くとることができる望遠鏡を使用するなどして、背景となるべき星の数さえ確保できれば、決して不可能ではないだろうという結論に達した。金星ならば、地球からの距離が大きく変わるので立体視の違いがでると一段と楽しいだろう。ここまでできれば、太陽系の大きさの測定まで演繹できるのではなかろうか。金星は、地球照

の月より遙かに明るいので撮影は困難かもしれないが、機会があれば挑戦したいと考えている。

欠くことのできない協力者の皆さんについて本文中でも紹介したが、改めて感謝の意を表したい。ここでは名前を挙げなかったが、天候の都合などで参加を表明されていたが撮影に成功しなかった方も何人かいらした。これらすべての人々の協力がなければ今回の話も絵に描いた餅で終わっていただろう。

今回の試みが、学校教育や社会教育の場で、実際に行われるようになり、「奥行きのある宇宙」の理解への参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 戎崎俊一, 1996, 科学, 66, 9, 591
- 2) 尾久土正己, 2000, 天文月報, 93, 2, 86
- 3) 戎崎俊一, 1997, 天文月報, 90, 9, 423

Coming Moon Project; make a stereograph of the moon using geological parallax
Toshihiro HANDA (*University of Tokyo*), **Hidehiko AGATA, Hiedo FUKUSHIMA** (*National Astronomical Observatory, Japan*)

Abstract: Distance to each celestial body is different. Although it is a basic astronomical concept, it does not look like. It is because distance to a celestial body is beyond imagination of non-astronomers. In order to break this feeling, demonstration of stereographic photos should be effective. Geological parallax of Moon using a several hundred kilometer baseline is large enough to make such stereograph. In December 1999, we took it by simultaneous observations at several distant places in Japan. Although we took it with conventional photochemical films, digital photo and telecommunication such as the Internet make it easier. We propose a campaign like this as the first step to introduce astronomy.