

ケニヤ日食観測

金沢輝雄・編 暦 課

Observation of the Solar Eclipse in Kenya

By

Teruo Kanazawa : Astronomical Division

1. まえがき

1980年2月16日に中部アフリカからインドにかけて皆既日食が見られた。水路部では観測隊をケニヤに派遣し、日食の接触時刻の測定をした。この観測の目的は皆既日食の接触時刻の測定によって太陽と月の相対位置を高精度で決定し、天体暦の検定を行うことである。この測定の原理や方法を紹介し、成果の整約状況について報告する。

2. 水路部の日食観測

水路部は、天体暦の検定を目的として、第二次大戦以前から日食観測を続けている。戦後の観測を第1表に示す。日食は、太陽、月、地球が一直線に並んだときに起こる。そこで、日食の接触時刻を測定することにより、観測点から見た太陽と月の相対位置を決めることができる。観測点の地表における位置を測量によって求めれば、これによって太陽や月の運動を記述した天体暦をチェックするためのデータが得られる。太陽は非常に明るい天体であるため、普段その位置を観測することは容易なことではない。皆既日食は、太陽と月が同一の方向に存在し、かつ太陽の輝きが失われるという好都合な状況を与えてくれるきわめて貴重な機会である。

日食の接触現象には4つの場合がある。太陽が欠け始める第一接触、太陽または月が他方に完全に含まれる第二接触(皆既または金環食の始まり)、皆既または金環食の終わる第三接触、そして月が太陽を離れて日食の終了する第四接触である。第一接触と第四接触は太陽のほぼ全面が輝いているため、接触時刻を精密に測定することは難しい。また、金環食の場合にも太陽光が完全になくなる瞬間がこないため、測定の難しさの点では部分食の場合と同じである。そこで、皆既日食の第二、第三接触を観測の対象とするが、第二接触と第三接触とでは時間の向きが逆になるだけで、同じ内容の現象が見られるので、ここでは第二接触の場合について述べる。

3. 接触観測の原理

皆既食の始まる直前には、太陽は細い円弧となり、それが両側から縮んでいってついには消滅する。その瞬間が第二接触の時刻である。実際には、月の山の凹凸のために山の所では太陽の光が早く消え、谷の所ではまわりより遅くまで光が残る。そのために、太陽の円弧は短くなるにつれてぶつぶつと切れ目ができ、ベイリービー

第1表 水路部の日食観測

年 月 日	観測地点
1948. 5. 9	r 礼文島
1955. 6. 20	t ベトナム
1958. 4. 19	r 青ケ島、宝島、奄美大島
1958. 10. 12	t スワロフ (北クック諸島)
1962. 2. 5	t ラエ (ニューギニア)
1963. 7. 20	t 網走
1965. 5. 30	t マヌアエ (クック諸島)
1970. 3. 7	t メキシコ
1973. 6. 30	t モーリタニア
1976. 10. 23	t オーストラリア
1980. 2. 16	t ケニヤ
1983. 6. 11	t インドネシア

r: 金環食、t: 皆既食

ズ(ベイリーの数珠)とよばれる幾つかの破線にわかれてくる。太陽の輝きが最後の1点になるころには内部コロナによって月の輪郭が浮びあがり、ダイヤモンドリングとよばれる状態になる。この輝きが消滅すると皆既食の始まりとなる。

接触の時刻を測定する場合に、考慮しなければならない問題が幾つかある。

(1)、月の山の凹凸のために、太陽の円弧は複雑な濃淡を作りながら消えていく。このため、月の山の形をきちんと決めておかなければ、その瞬間に月の中心がどこにあったかを知ることはできない。(山の高さを測定するための高さゼロメートルの基準面を介して、月の中心の位置が決まる)

(2)、太陽はガスの塊であるため、地球や月のようなはっきりとした境界はもっていないが、中心から外側へ向かっていくと、ある領域で急激に明るさが減っている。その領域のどこを太陽の縁とみなすのか決めなければならない。

(3)、太陽の明るく輝く円盤状の領域を光球と呼ぶが、この光球の光は連続光で、その中にフラウンホーファー線とよばれる吸収線が多数みられる。ところで、この光球の外側にはコロナとの間に彩層とよばれる太陽半径の100分の1程度の薄い層がある。彩層の光は非常に弱いので光球が輝いている時には見えないが、日食の際、光球が月におおわれた後、数秒間だけその輝きが現われる。この光は連続光ではなく、輝線として特定の波長だけで見える。光球が月に隠された後も、彩層から出る光のために太陽の縁の観測がむずかしくなってしまう。

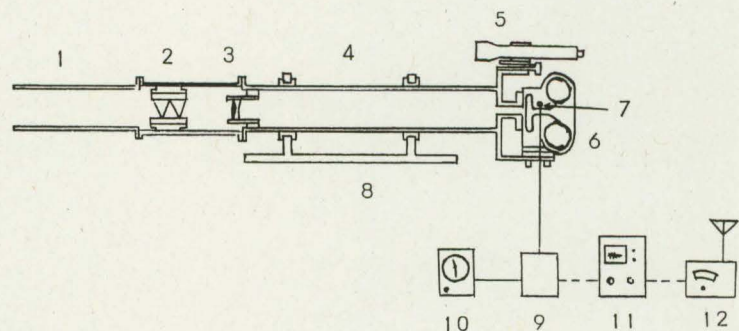
これらの問題点を解決するため、水路部では接触時の円弧状の太陽光を、プリズムによってスペクトルに分散し、それを16mm映画に撮影することにより、弧の消長を記録するという方法をとっている。接触時のスペクトルには彩層の輝線が現われることから閃光スペクトルとよばれるが、接触時刻の観測という立場からは、彩層の輝線を避けて光球の連続光の部分測定に使用する。フィルムの各コマの濃度を測定し、弧上のそれぞれの点に対して濃度が一定の値になる時刻を求め、それに月の山の高さを補正すると、各点における月の基準面と、ある明るさの場所として定義された太陽の縁との接触時刻がわかる。

これらのデータを、半径の異なる2つの円の重なりという幾何学的配置を考慮して解析すれば、太陽と月の中心が、どの時刻にどのような位置関係にあったかを定めることができる。

4. 観測方法

観測に用いる望遠鏡の構造を、第1図に示す。望遠鏡の前部にプリズムをつけ加え、直焦点に16mm撮影機をとりつけてある。プリズムの大きさは6cm四方で、望遠鏡は口径8cm、F15のアポクロマートレンズを使用している。

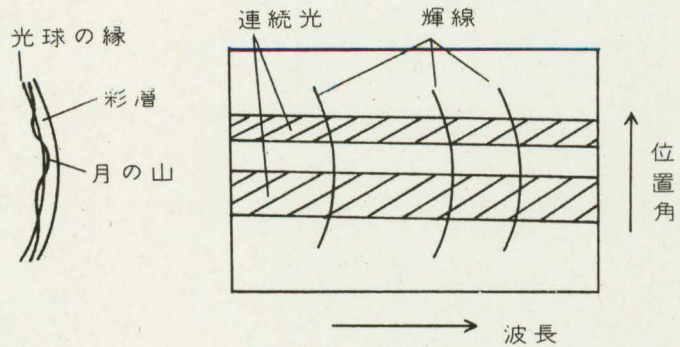
プリズムは直視条件を満たすように、SF2のプリズムを、2枚のBK7プリズムではさんである。1枚だけのプリズムでは、分散した光が大きく屈折を受けるため、望遠鏡の筒先をその分だけ目標からずらせて、そっぽを向いた状態にしなければならない。これでは第二接触と第三接触の間で分散の向きを変えるときに、望遠鏡の向きを大きく変えなければならず、短時間では調整できない。直視プリズムは分散した光が特定の波長で直



第1図 望遠鏡の構造
 1.フード 2.プリズム 3.レンズ 4.鏡筒 5.案内望遠鏡
 6.16mm撮影機 7.発光ダイオード 8.架台取付部
 9.電子回路 10.水晶時計 11.シンクロスコープ
 12.短波受信機

進するように設計されているので、筒先を目標物の方向と一致させることができる。分散の方向を変えるときは、鏡筒全体を回転させるだけでよい。

観測の時点では太陽の弧は非常に細くなっており、ちょうど弧状に湾曲したスリットを通過した平行光線とみなしてよい。この光を弧と垂直の方向に分散させ、望遠鏡の対物レンズにより結像させると、その焦点に置いた16mm撮影機の視野には第2図のように、月の谷の部分からもれてくる



第2図 接触とそのスペクトル

光球の連続光（濃淡の縞）と、さらに外側にあるため、まだ隠されていない彩層からの輝線（弧状）とが現われる。調整のしやすい明るい輝線の $H\beta$ （4860Å）付近を視野の中心に置き、約70Å/mmの分解能を持っている。太陽像は直径1.2mmの円となり、弧状の対応する月縁の位置角に直して、 0.2° の分解能が得られる。

これを毎秒16コマ程度の速さで撮影すれば、時間とともに弧上の各点での、光の減っていくようすが記録される。水晶時計から作り出した時刻信号により、毎秒10回発光ダイオードを点滅させ、これをフィルムの方の方写しこんでおくことによって、撮影時刻を読み取ることができる。水晶時計の進み遅れは、協定世界時に基づいて短波で放送されている報時信号（秒ごとのパルス）によって検定する。ケニアでは、アメリカのWWV、ハワイのWWVHなどが受信できたが、ハワイの電波は電離層の状況により、地球を半周以上する遠回りの側から届いていることが確認された。この場合には、ハワイで発射された電波がケニアに届くまでの伝搬時間の補正が、0.082秒にも達する。

観測は第二接触と第三接触に対して実施する。ちょうど食の中心線上で観測していれば、月の中心は太陽の中心の上を通過し、第二、第三接触は 180° 離れた2ヶ所で起こるが、中心線からわずかでも離れると接触点の北極方向角は対称にはならない。従って、弧の方向に垂直に分散させようとする、第二接触と第三接触の間に分散の向きを変える必要が生じる。ところが、第二接触から第三接触まではまさに皆既食中であるから、継続時間は数分しかなく、しかも地表は夜のような暗さになるので、余り複雑な操作は好ましくない。われわれの望遠鏡では直視プリズムを用いているので、鏡筒全体を任意角回転させることにより、暗闇の中でも迅速に次の観測態勢を整えることができる。このようにして、第二および第三接触のようすをそれぞれ約1分間撮影する。

撮影したフィルムから光の強さを求めるには、特性曲線とよばれる光の強さとフィルム濃度の関係を知る必要がある。これには、濃度の分かっているフィルターを使用し、濃淡をつけたコマを撮影しておく。フィルムの露光から現像まで、すべての条件をできるだけ均一に近づけるには、この比較光の撮影も、日食の前もしくは後のなるべく近い時刻に行うことが望ましい。そのため、望遠鏡の前部にさらにスリットとコリメータをとりつけ、部分食の状態にある太陽を光源として、比較光の撮影を行う。

5. 位置の測量

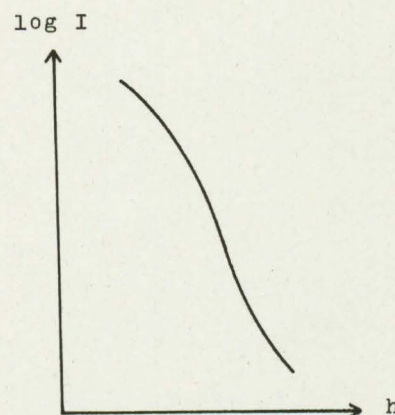
地表から見る太陽と月の位置関係は、見る場所によって異なるので、観測点が地表のどの部分にあったかを指定しなければ、接触時刻の観測は意味をなさなくなってしまいます。そこで、観測点の経緯度を測量によって求めておく。この場合、世界の各地域でそれぞれ独自に採用されている局地的な測地系では、地球中心との関係がはっきりしないので、観測点の位置を世界測地系に対して決める必要がある。この目的のためには、米海軍航行衛星（NNS）が適しており、陸上測量用の航行衛星受信装置を設置して衛星の電波を受信し、観測点の位置を決定する。その測定精度は10メートル程度で、接触現象の解析から得られる角方向の精度を 0.01 と考えると、

地表での距離に換算して約20メートルであるから、つり合いがとれている。

6. 観測データの整約

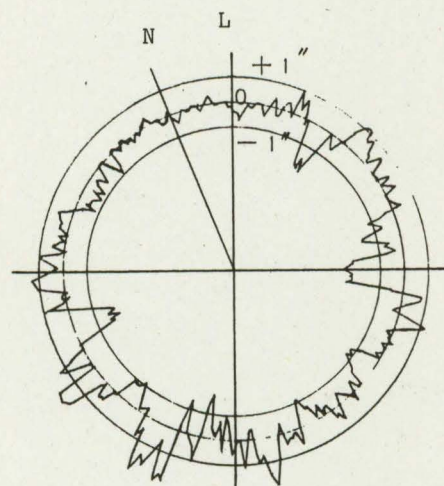
接触観測のフィルムは、マイクロフォトメータを使って濃度を測定する。測定は彩層の輝線の弱い所を選んで波長4615Åを中心に、幅6Åで弧の方向に掃査する。各コマで月縁上の同一の場所を確定するために、顕著な山や谷を用いて位置角の基準とし、接触前後の数コマについて測定を行えば、弧上の各点における光の強さの時間変化が得られる。

太陽の縁の部分での、高度に対する光の強さの関係は第3図のようになっており、その勾配は変曲点の所が最も急になっている。どの高さを太陽の縁であると定義するかは、データの整約上は自由であるが、他の観測と比較するためには、この変曲点を使うのがよい。フィルム上のある濃度で太陽の縁を定義することにより、弧上の各点での太陽の縁と月縁との接触時刻が0.01秒の精度で求められる。



第3図 太陽の縁での光の強さの変化

月の山の凹凸の補正については、月縁図の形で発表されているものを用いる。日食時に見える月の形は、ちょうど観測点から見て、接線方向にあたる場所に位置する山や谷のシルエットであり、これはふだん見える月の形を観測することによって決めることができる。地球から見る月の向きは、秤動によって $\pm 8^\circ$ くらいは動くため、数多くの観測をよせ集めれば、秤動と月縁に沿って月の北極から測った位置角とを引数として、山の高さを与えることができる。これを図にしたものを月縁図とよんでいる。ケニヤ日食について、ワッツの月縁図をもとにして、月の山の凹凸を表わしたものを第4図に示す。山の高さは大きく誇張してある。



第4図 ケニヤ日食の月縁図
(N: 天の北極、L: 月の北極)

7. 成果の算出と利用

天球上で月の進む速さと向きは、天体暦から予報される数値を求める。すると弧上の各点での接触の時刻の差は、天球上での角度に換算され、これに月の山の補正を加えて月と太陽の位置関係を求める。未知数は、ある時刻における太陽と月の、赤経、赤緯、および半径の各々の差である。それ以外にもワッツの月縁図の位置角のゼロ点がずれている可能性も考慮に入れて、この補正值も未知数としてもよい。

この閃光スペクトルの撮影による方式の観測は、1970年のメキシコ日食以後、採用しており、太陽と月の相対位置の決定精度は、月の進行方向で $0''.01$ に達し、それと垂直な方向で $0''.1$ が得られている。中心線での観測では、月の進行方向の成分にウエイトがかかるので、それに垂直な成分の決定精度が落ちる。そこで1973年からは緯度観測所の観測隊の協力を得て、中心線付近だけでなく、南北の限界線の近くにも観測点をもうけ、月の進行方向に垂直な成分にウエイトをおいた観測も試みている。

これによって、太陽と月の相対位置を、両方向に対して精度よく決められるので、天体暦の検定に効果がある。そのほかにも、太陽と月の相対半径を両方向で決めることができるので、月縁図の基準面が東西と南北とで一樣になっているかどうかの検定も行える。将来、月の探査が進めば山の高さや形についてのより正確な情報が得ら

れるであろうから、そのようなデータと組み合わせることにより、太陽の形が本当に球であるかどうかとか、太陽半径が経年的に変化しているかどうかなどについての議論もできるはずである。

8. ケニヤ日食の観測状況

ケニヤでは、マリンジ北方にあるローマ大学宇宙空間研究所のサンマルコ赤道発射場に滞在し、同構内で日食中心線の観測を、またタラサ中学校の校庭で北限界線の観測を実施した(第5図)。限界線での観測といっても、ぎりぎりの線上では接触点の位置角の変化が速く、観測が難しいので、ある程度中へ入って中心線と同様の方法で観測を実施する。南限界線では、緯度観測所が同種の観測を実施している。今回は北限界線が雲のため観測できなかったが、中心線と南限界線はうす雲を通して観測に成功しており、データの整約を進めている。

ある位置角における濃度変化の様子を例として第6図に示す。雲の影響が強く表われており、それをどれだけ除去できるかが成果の精度にきいてくる。雲の影響は時間的にも空間的にもかなり小さな塊として表われていると考えられるので、各位置角での測定結果に対し、規定のフィルム濃度周辺のデータ10点を取り出し、直線近似の最小二乗法で規定の濃度に達する瞬間、すなわち各位置角での接触時刻を一応求めてみた。現在この方法が妥当かどうかについて検討中であり、最終結果については、緯度観測所のデータとも結合した上で、別の機会に発表する予定である。

これまでの日食観測結果については、以下の文献を参照されたい。

編暦課 1957、水路要報第52号

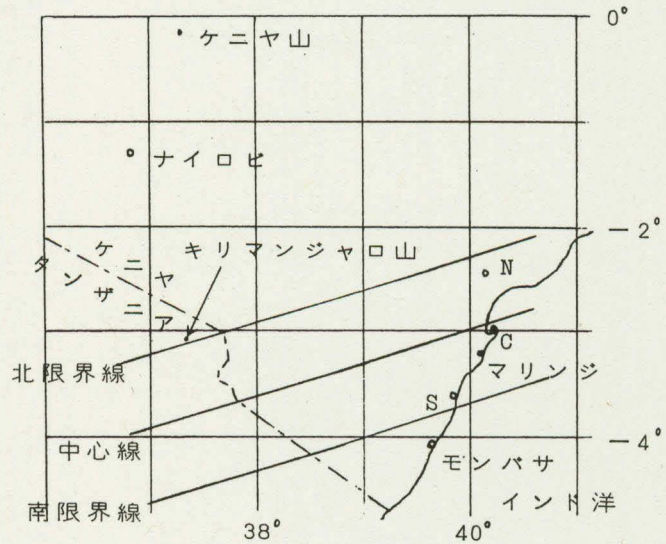
編暦課 1960、水路要報第63号

Yamazaki, A., 1962: Solar eclipse committee of science council of Japan, 1.

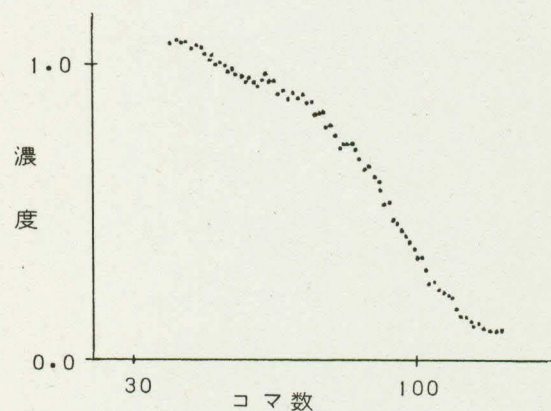
Mori, T., Kubo, Y., 1971: Report of Hydrographic Researches, No. 7, 39.

Mori, T., Kubo, Y., 1976: ibid., No. 11, 39.

Mori, T., Ganeko, Y., 1976: ibid., No. 11, 43.



第5図 ケニヤ日食の観測点
C、N、S: 中心線、北限界線、南限界線の各観測点



第6図 フィルム濃度の時間変化の例