



2012年11月14日の皆既日食中に出現した CME (Coronal Mass Ejection) の観測



大越 治

〈日食情報センター* 〒182-0023 東京都調布市染地3-1 多摩川住宅ト-1-408〉

e-mail: sol-eclipse.ohgoe@nifty.com

2012年11月14日、オーストラリアから南太平洋にかけて皆既日食が起り、筆者はニュージーランドの北約500 kmの海域で、客船ぱしふいっくびいなすの船上からこれを観測した。得られたコロナ画像にはCME (Coronal Mass Ejection) が写っていただけでなく、その変動の様子も捉えられていた。約35分前にオーストラリアで撮影されたコロナには、このCMEは存在していない。得られた画像のうち三つを選んで測定し、CMEの速さと加速度を求めたところ、見かけの速さが220~580 km/s、見かけの加速度は2.5~3.7 km/s²であることがわかった。

1. はじめに

2012年11月、オーストラリア北部から南太平洋にかけて皆既日食が起きた。この日食は世界時の13日20時30分過ぎに始まって23時40分過ぎに終わるため、日付は「11月13日」と示されることが多い。しかし、オーストラリアをはじめ南太平洋上でも、日食が見られる場所の現地時刻では11月14日になるので、この稿では「11月14日の皆既日食」と書くことにした。

2. このサロスとの因縁

サロスとは日食や月食の周期を表す言葉の一つで、18年と10~11日の周期で似た条件の食が起ることを言う。サロスにはいくつものシリーズがあり、それぞれに番号が振られている。今回の日食のサロスナンバーは133。このシリーズは1219年7月13日に北極近くの部分日食で始まり、2499年9月5日に南極近くで終わるまでに、皆既

日食を46回、金環日食を6回、ハイブリッド日食を1回、部分日食を19回、合計72回の日食を起す。皆既継続時間が最も長かったのは1850年8月7日の皆既日食で、ハワイ南西海上で6分50秒。その後はしだいに継続時間を減らしながら日食帯を南にずらしてきた。今回はシリーズの中で26番目の皆既日食である¹⁾。

私がこのシリーズに初めて出会ったのは2サロス前の1976年10月23日、オーストラリアのビクトリア州、マウント・エミューであった。この時は東京理科大学天文研究部日食観測隊の一員として、内部コロナの偏光観測を受け持っていた。残念ながら当日は雲が多く、1.5 R_☉ (R_☉は太陽半径) 程度のコロナしか撮影できなかった。もちろん雲のために偏光のデータは取れず、あわよくば卒研の材料に、という思惑は外れてしまった²⁾。

2度目にサロス133に出会ったのは1994年11月3日、南米ボリビアの標高4,000 mを越すウアチャカリヤであった。このときはその高度を活か

* 日食情報センターとは、1978年に創設されたボランティア組織で、主に日食のために海外遠征をするアマチュアのために、「日食情報」誌の発行や勉強会・発表会などの開催を通じてさまざまな情報提供を行っている。

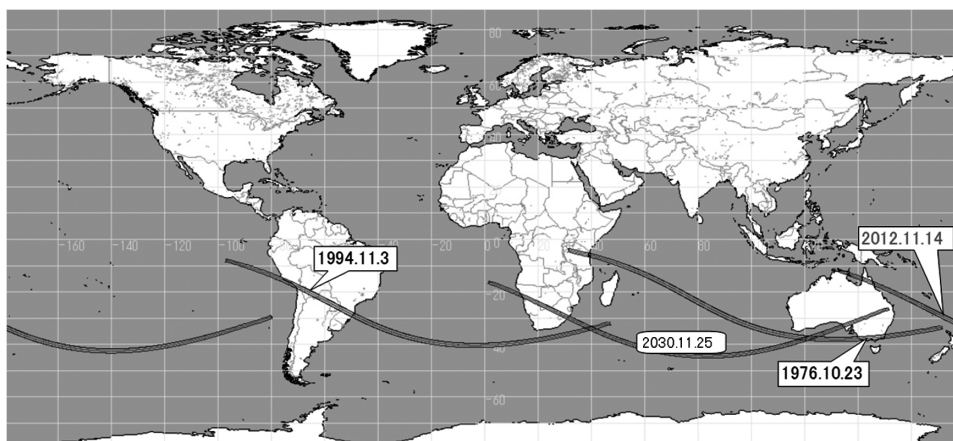


図1 私が観測したサロス133. WinEclipseで作成, 筆者加筆 (果たして2030年は観測できるか?).

してコロナの赤外線観測に挑むことにした。残念ながらこの時も薄雲があり、5R \odot 程度までのコロナは見たものの赤外線観測は失敗に終わった³⁾。なお、このときは皆既日食が人体に与える影響を調べるため、自ら心電図を装着しての観測も行っている。

そして今回は3度目のサロス133である。初回からだんだんと雲の量が少なくなっている。3度目は良い天候に恵まれるに違いないと信じて準備を進めた(図1)。

3. 今回の日食に向けて

この日食を逃すと今後数年はアクセスや安全面を考えたときに条件の良い皆既日食がないということで、日本各地から大勢の日食ファンが遠征を試みた。筋金入りの日食好きを自認する私も例外ではなく、当初は東京理科大学天文研究部とOB会が計画した観測隊に加わって、オーストラリアのケアンズ周辺で観測するつもりでいた。ところが家庭の事情で、直前までほんとうに行けるかどうかかわからない事態になった。理科大隊は手配旅行のため、直前のキャンセルは多大な迷惑をかけてしまう。遠征できるようになったときのことを考え、別動隊として「ぱしふいっくびいなす」の「皆既日食・ニュージーランドクルーズ」に、妻

と二人で申込みをすることにした。うまくすると、オーストラリアで観測する本隊と太平洋上の「ぱしふいっくびいなす」で2点観測が行える可能性も考えてのことである。ようやく10月中旬になって確実に遠征できるようになり、11月10日、妻と二人で成田空港を出発して乗船地のニューカレドニアに向かった。

4. 観測海域と接触時刻

「ぱしふいっくびいなす」は、11月12日にニューカレドニアのヌメアを出港して11月15日にニュージーランドのオークランドに入港する。その間に皆既帯を横切りながら日食観測を行うのである。船としての機動性を活かして当初はおおまかに観測海域を設定しておき、入手できる気象情報をもとに晴天域を確実に捉えることを目指した。ただ、クルーズの日程が決まっているため無制限に海域を選べるわけではない。ニューカレドニアを出航する日時、船のスピード、オークランドに入港する日時を勘案して、図2のような範囲を決めていた。

また、皆既中は基本的に太陽を船尾側に見て船を進める(月の影が動く方向とは逆に、西に向かって進む)。これは、フルクルーズ(本来の「ぱしふいっくびいなす」のクルーズ期間は約1

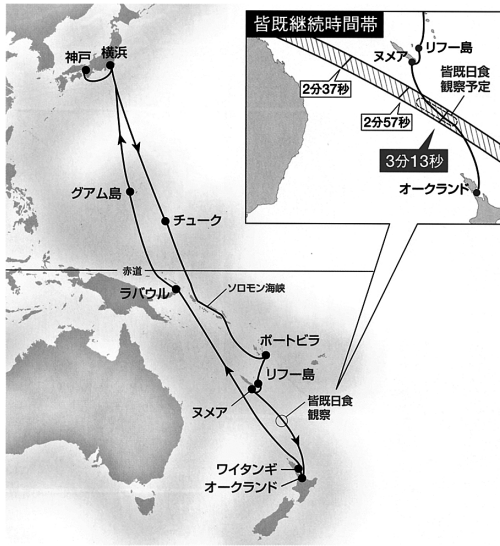


図2 観測予定海域. ツアーパンフレットより.

カ月あり、私たち日食ファンがその一部分だけ乗船するのは「区間クルーズ」になる)の乗客が船尾にあるスポーツデッキにイスを並べて、シアターのように日食を観望するためである。月の影が動く方向に船を進めれば皆既継続時間が延びるように思いがちだが、船のスピードは遅いためそのような効果はない。ということは、影と逆に進んでも継続時間が格別短くなることもない。船の進む方向については、当日の風の強さ、波の高さ、潮の向きなどを勘案して、最終的に最も船の揺れが少なくなるように船長が判断する。

実際の観測海域は、中澤潤氏から提供を受けたGPSデータの一部をプロットした図3のとおりである。これを見ると、船は第2接触直前に大きく北に進路を変え、皆既中にはスピードも大きく変えて、第3接触近くではほとんど停船状態だったことがわかる。実際には、皆既前後を通して太陽はほぼ船尾方向にあったことから、船が推力を落としたことによって潮の流れに押され、皆既中はほぼ横滑りの状態で流されていたようだ。これは積雲が太陽にかからないようにするための操船によるものであった。

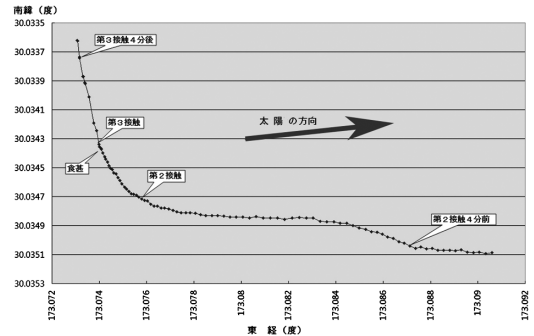


図3 皆既前後の船の針路. GPSデータ提供: 中澤潤氏.

地理的な観測海域はニュージーランドのノースケープ北約500 km, 持参したGPSで求めた緯度と経度, およびフラッシュベクトルで求めた接触時刻(世界時)は以下のとおりである。

第2接触	21時13分12秒	南緯30度02分04秒	東経173度04分32秒
食甚	21時14分50秒	南緯30度02分03秒,	東経173度04分26秒
第3接触	21時16分28秒	南緯30度02分02秒	東経173度04分23秒
皆既継続時間	3分16秒		

5. 観測計画

この日食に対し、私は以下の項目で観測を行う計画を立てた。

- (1) コロナの白色光観測, (2) フラッシュベクトル撮影, (3) 全天撮影, (4) 本影錐撮影, (5) シャドーバンド撮影, (6) 観測風景撮影, (7) 気象・天頂輝度観測

(1)は、国立天文台太陽観測所の花岡庸一郎准教授の呼びかけで行われた「アマチュアによるコロナのネットワーク観測」⁴⁾のための観測であり、本稿で述べるCMEはこの観測で得られた画像が捉えたものだ。以下、(1)について述べる。



図4 船のデッキに設置した撮影機材。

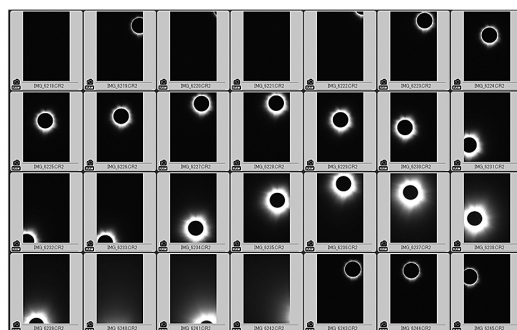


図5 船の揺れによる撮影結果の例。

5.1 おもな使用機材

ボーグ100ED+レデューサー ($D=100\text{ mm}$, $f_l=512\text{ mm}$), EOS KissX3 ボディー, コロナマスター2E, ナカニシイメージラボ $D=4.2$ フィルタ, フジアセテート ND1.8 フィルタ, タカハシスペースポイ赤道儀 (図4)

5.2 撮影計画

今回の皆既継続時間は、観測予定海域の中央付近の局地予報では約3分17秒である。この間にできるだけ多くの画像セットを得るため、カメラの設定を、ISO=800, 1コマ/秒, 画質=RAWと決め、露出セットを「1/2,000, 1/1,000, 1/500, 1/250, 1/125, 1/60, 1/30, 1/15を各3コマの8段階、合計24コマ」として、全部で6セットを得る計画を立てた。シャッター制御には日食写真専用に川村 晶氏が開発されたコロナマスター2Eを使用し、以下のように計画した。

第2接触10秒後にコロナ多段階露光スタート

- ・第1セット：コロナ (1/2,000→1/15, 各3)
- ・第2セット：コロナ (1/2,000→1/15, 各3)
- ・第3セット：コロナ (1/2,000→1/15, 各3)

インターバル8秒間

- ・第4セット：コロナ (1/15→1/2,000, 各3)
- ・第5セット：コロナ (1/15→1/2,000, 各3)
- ・第6セット：コロナ (1/15→1/2,000, 各3)

これで144コマのコロナ画像が得られる (はず)。

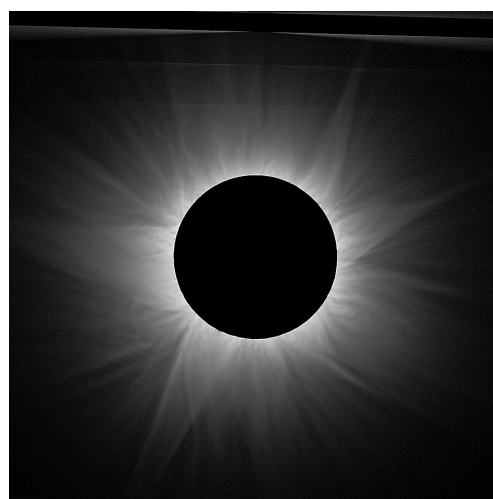


図6 グループ3で再現したコロナ像。

6. 撮影結果

第2接触直前に全天カメラのトラブルのため時間を取られたことと、船が進路変更したことに対応できず、第2接触のダイヤモンドリングはすべて写野の外に外れてしまった。また、当日の船の揺れは思いのほか大きく、コロナの画像もかなりの部分が写野からはみ出してしまう結果になった。図5にその一部を示す。

得られた画像からは、かろうじてコロナを再現するのに使えそうなものを5グループ選び出すことができた。

各グループの画像は塩田和生氏の開発による

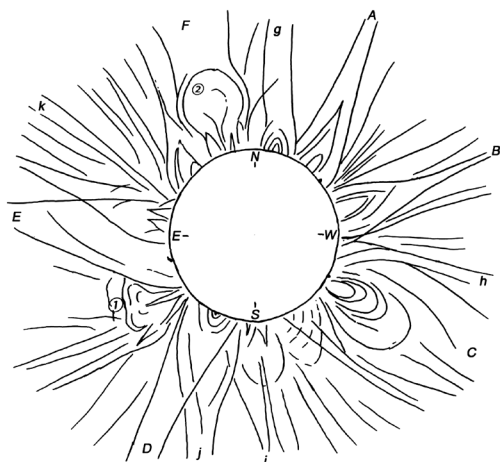


図7 今回のコロナの形状.

R-USM法⁵⁾によって処理を行った。ここでは例としてグループ3から作成した画像を示す(図6)。使用コマ数を稼ぐためにコロナ像がコマの端に寄っているものも使用したため、Photoshopの処理で「ぼかし(放射状)フィルター」をかけたときにできたスジ模様が上部に残っている。

コロナ画像から特徴を抽出したものを図7に示す。ストリーマーが全方位に伸びている様子から、極大型のコロナであることが一目でわかる。ストリーマーに付けた記号のうち、大文字の「A」-「F」は明るく肉眼でもよく目立っているストリーマー、小文字の「g」-「k」は大文字のストリーマーほどではないが、比較的形がはっきり見えたものである。特徴的なものはまず①で、これがこの稿の主役のCME(Coronal Mass Ejection)である。②は泡状の空洞のように見える構造であるが、今のところ詳細はわからない。

皆既終了後すぐ、双眼鏡で観察していた妻が「なんだかググリしたコロナが見えた」と言うので、その場で撮影した画像を再生して「この部分だ」ということを確認・特定した。それが①の構造である。残念ながら、私は船の揺れで大きく動き回るコロナをカメラの写野内に保つことに夢中で、その構造を見た記憶がない⁶⁾。

帰国後、ネット上に公開されているオーストラリアで撮影されたコロナ画像を見たとき、非常に違和感を感じた。その理由は再び自分の未処理の画像を見てすぐにわかった。オーストラリアで撮影されたコロナ画像には、①の構造がない。①の構造はCMEに違いない。船上で再生した画像を見たときに、その形からすぐに気づくべきだった。とあとから言っても仕方がない。

7. 皆既中のCME

7.1 コロナの形状変化

コロナの形状が日食ごとに違うことは日食ファンならば常識であり、コロナの写真を見るだけでいつの日食かを当てることは難しくない。これは、コロナの形状が太陽活動の盛衰によって一定の傾向(太陽活動の極大期には四方八方に広がり、極小期には赤道方向に伸びる)はもつものの、個々のコロナ構造は常に変化していて同じ形のコロナは二つとないからである。

コロナの変動は極めてゆっくりであり、数日から数週間かけて変化するものと考えられていたが、1950年代から、コロナグラフを使った観測によって速い変化もあることが知られ始めた。1973年には、有人宇宙船スカイラブに搭載されたコロナグラフによってフレアに伴うコロナの急激な噴出が観測され、コロナ突発現象(coronal transient)と名づけられた⁷⁾。今ではSOHOをはじめとする太陽観測衛星のコロナグラフによって、大規模なコロナ質量放出CMEが多く観測されている。

一方、コロナグラフを使うのではなく、皆既日食の時にコロナがどのくらい変動するのかを探る観測も行われてきた。古くは1936年6月19日の皆既日食で、京都大学花山天文台はロシアのオムスク、満州(当時)、北海道の3カ所にコロナ変動を探る目的で観測隊を送っている⁸⁾。

アマチュアの取り組みとしては、1976年10月23日のオーストラリア皆既日食(今回の2サロス

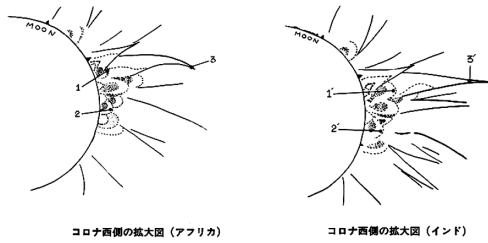


図8 1980年2月16日の日食におけるコロナの変動.
東京理科大学天文研究部OB会.

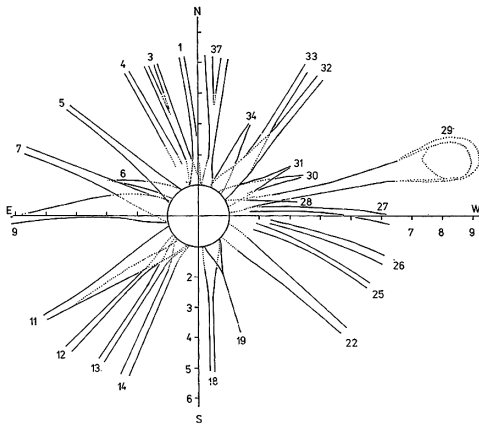


図9 1980年2月16日の日食におけるコロナ¹¹⁾ (V. Rušin, M. Rybanský: Structure of the Solar Corona during the Solar Eclipse of 1980 February 16.) 「テニスラケット」は29の部分. また, 図8の3は28のストリーマに相当する.

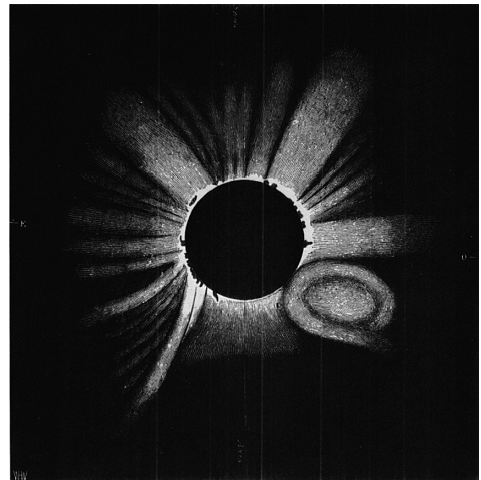


図10 1860年7月18日, スペイン西部のトレブランカで見られたコロナのスケッチ (Tempel)⁷⁾.

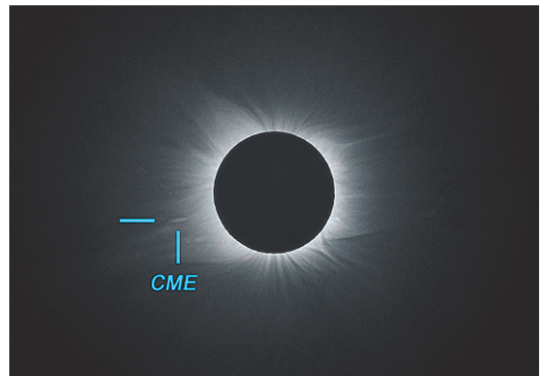


図11 2010年7月11日の日食におけるコロナ.
フランス領ポリネシア・ハオ島にて 筆者撮影.

前!) のとき, 地元のアマチュアが多点観測によるコロナの変動検出を試みたが, 悪天候のため目的を達することができなかった. 日本では1980年2月16日の皆既日食の際, 東京理科大学天文研究部OB会の観測隊がケニアとインドの間で初めて多点観測を試みた. その結果, アマチュアとして世界で初めてストリーマやループ構造の変動を捉えることに成功し (図8), 変動の速さの視線方向に垂直な成分を求めることができた⁹⁾. なお, 同日食では川崎天文同好会のメンバーも変動を捉えることに成功している. またこのときの日食では, 「テニスラケット」というニックネームが付けられたコロナルトランジェント (≒CME) がケニアで観測されたが (図9), 約90分後の

インドでは観測されていない¹⁰⁾.

皆既中にCMEが発生すること自体はそれほど珍しいことではない¹²⁾. 観測に写真が使われる以前のスケッチにもそれらしい構造が描かれているものがあり¹³⁾, 私自身も2010年の皆既でそれらしい構造を捉えたことがある¹³⁾ (図10, 11).

今回の日食で特筆すべきは, 単にCMEを捉えたことだけでなく, たった1カ所における観測でその変動もわかる画像が得られたことである.

7.2 画像処理

かろうじて得られた5セットのコロナ像を使え

ば、CMEの見かけの速さだけでなく加速度の変化まで求められる。しかし、不安定な船上で撮影した画像には船のローリングとピッチングだけでなく触先の向きのわずかな変化による微妙な回転も加わっているため、今回は大きな傾向をつかむことだけを目的に、グループ1 (G1), グループ3 (G3), グループ5 (G5) の3セットを使うことにした。

また、時間分解能を高め、かつCMEのフロント部分を際立たせるため、R-USM法のように複数の画像から合成した画像を作るのではなく、各グループから一つずつの画像を選んで使うことにした。その際、CMEの構造がコロナの一般的な輝度分布に埋もれないように、太陽の接線方向の構造を強調する処理を行う。

元画像としては、CMEのフロント部分と思われる場所が適正露出に近い1/250秒のものを使った。使用した画像は下記のとおり。今回はCMEのフロント部の位置を求めるだけなので、各画像ともダークおよびフラットの補正はしていない。

	コマNo.	時刻 (UT)	露出
・ G1 より	6229	21 : 14 : 13	1/250
・ G3 より	6277	21 : 15 : 08	1/250
・ G5 より	6329	21 : 16 : 13	1/250

7.3 測定

各画像における月と太陽の視位置などは以下のとおり (ステラナビゲータ9, AstroArtsによる)。

No.	太陽	月
No. 6229		
視赤経	15h 17 m 57.3s	15h 17 m 56.1s
視赤緯	-18°14'23"	-18°14'13"
視直径	32.3'	33.9'
No. 6277		
視赤経	15h 17 m 57.4s	15h 17 m 58.0s
視赤緯	-18°14'23"	-18°14'22"
視直径	32.3'	33.9'
No. 6329		
視赤経	15h 17 m 57.6s	15h 18 m 00.1s

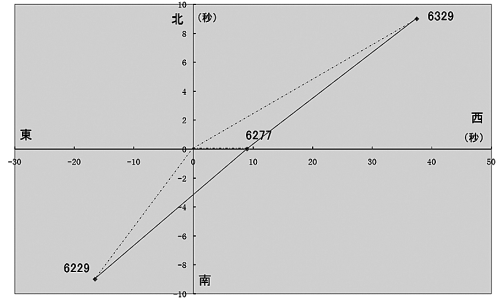


図12 月の中心を原点にした太陽中心の位置。

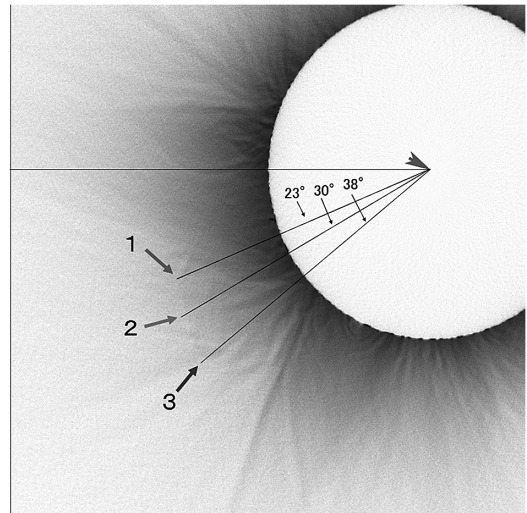


図13 CMEのフロント部を決めるために、太陽中心から3方向の濃度分布を見る。

視赤緯	-18°14'24"	-18°14'33"
視直径	32.3'	33.9'

これを基に、月中心を基準にした太陽の中心の移動の様子を図12に示す。

CMEが膨張していく速さを求めてみる。

まず、CMEのフロント部とおぼしき場所を各画像から特定し、太陽中心からの距離を求める。図13のように太陽の中心から画像の左 (東) に伸ばした線に対し、反時計回りに23°, 30°, 38°の方向に線を引く。図14のように、すばる画像処理ソフト・マカリのグラフ機能を使って線に沿った輝度変化を見てフロント部を決め、それぞれのフロント部をCME 1, CME 2, CME 3と名づけ

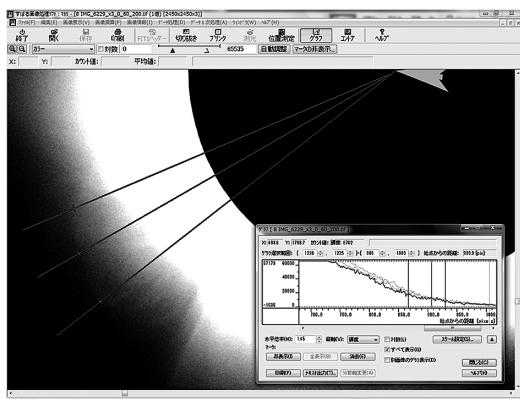


図14 マカリを使ってCMEのフロント部を決める。

る。始点(太陽中心)からCME 1-3までの長さをpixel単位で求めればよい。

使用した画像で月の半径=529 pixel,

この時の月の視半径=1,017秒,

太陽の視半径=969秒,

また、太陽の半径= 6.960×10^5 km,

G1とG3の撮影間隔=55秒,

G3とG5の撮影間隔=65秒である。

7.4 測定結果

G1-G5におけるCME 1-3の「太陽像中心からの距離」「速さ」「加速度」は以下のとおりである。

CME	(距離)	速さ	加速度
CME 1	G1 867.5 pixel		
			$(3.7 \pm 0.3) \times 10^2$ km/s
	G3 882.3 pixel	3.2 ± 0.8 km/s ²	
			$(5.7 \pm 0.2) \times 10^2$ km/s
CME 2	G5 908.9 pixel		
	G1 907.1 pixel		$(2.2 \pm 0.3) \times 10^2$ km/s
	G3 915.9 pixel	2.5 ± 0.8 km/s ²	
			$(3.7 \pm 0.2) \times 10^2$ km/s
CME 3	G5 971.5 pixel		
	G1 930.3 pixel		$(3.5 \pm 0.3) \times 10^2$ km/s
	G3 944.4 pixel	3.7 ± 0.8 km/s ²	
			$(5.8 \pm 0.2) \times 10^2$ km/s

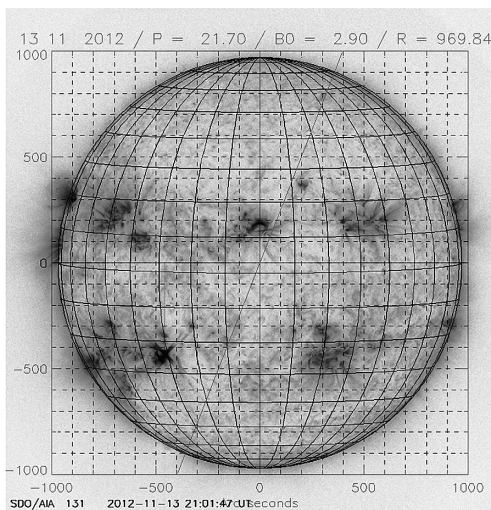


図15 SDOのAIA 131に太陽面経緯度図を重ねる。Courtesy of NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams. 経緯度図はBASS2000のサイトで作成 (<http://bass2000.obspm.fr/ephem.php>)。

誤差は、長さの読み取り精度を ± 1.0 pixel, 時刻は ± 0.1 秒と見積もった。

得られたCMEの速さは視線に対して垂直な成分であり、実際には速さ v で進行方向が角度 θ だけ手前に向いているとすれば、上記の値は $v \cos \theta$ にあたる。このCMEの元になったフレアは、SDOの画像によると世界時の11月13日21時付近で起きていることがわかる。このときのSDO画像を太陽面経緯度図と重ねたものが図15である。これから、CMEの元になったフレアは、太陽の見かけの中心から見て東に約 30° , 南に約 24° 付近で起きていたことがわかる。CMEのフロント部がフレアの起きた点から太陽面に垂直方向に移動していたと仮定すると、実際の速さはおよ

そ 360–930 km/s, 加速度はおおよそ 4–6 km/s² になるだろう。

8. 終わりに

今回、皆既中に得られた画像を基に CME の動きについての測定を試み、結果をまとめてみた。皆既中の CME を含めたコロナの変動を捉えるために、今までは 2 地点以上の多地点観測が必要と考えてきた。しかし、太陽活動の極大期近くで起きる日食では単独の観測でも測定にかかる変化を捉えうることがわかった。今後の観測ではこのことも考慮に入れて、画像の鮮明化と時間分解能の向上を工夫することが必要である。

この稿をまとめるにあたり、たくさんの助言をいただいた日江井榮二郎先生、画像処理の相談に乗っていただいた塩田和生さん、GPS データを快く提供してくださった中澤 潤さんに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) NASA Eclipse Web Site, Saros Series Catalog of Solar Eclipses, <http://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEsaros/SEsaros133.html>
- 2) 大越 治, 1976, オーストラリア日食観測報告 1976, 内田 直編 (東京理科大学天文研究部オーストラリア日食観測隊), 8–10
- 3) 大越 治, 1996, いんてい・ひわにゃ, 大越 治ほか編, 33–39
- 4) 花岡庸一郎, アマチュアによるコロナの科学的観測, <http://solarwww.mtk.nao.ac.jp/eon/>
- 5) 塩田和生, 大越 治, 2012, 日食のすべて (誠文堂新光社), 131–135
- 6) 大越 治, 2013, 2012 年日食観測記録集, 大越 治ほか編
- 7) Eddy J. A., 1974, A&A 34, 235
- 8) 柴田淑次, 1940, 太陽・日食と月食, 山本一清編 (恒星社厚生閣), 193
- 9) 大越 治, 三浦義治, 古川三千代, 加藤祥吾, 竹内孝, 脇原久美子, 1980, 1980 年日本天文学会秋季年会予稿集
- 10) Sky and Telescope, 1980, Vol. 59, 383–388
- 11) Rušin V., Rybanský M., 1983, Bull. Astron. Inst. Czechosl. 34, 257
- 12) Webb D. F., 1995, Journal of Geophysical Research 100, 5853
- 13) 大越 治, 2010, 2010 年 7 月 11 日南太平洋皆既日食観測記録集, 大越 治ほか編

CME Observation during the Total Solar Eclipse on November 14, 2012

Osamu OHGOE

Solar Eclipse Information Center, Tamagawa Jyutaku To-1-408, 3-1 Somechi, Chofu, Tokyo 182-0023, Japan

Abstract: During the total solar eclipse on November 14, 2012 the white-light corona was observed in the northern Australia and Pacific Ocean. I took many frames of white-light corona on the ship "Pacific Venus" cruising about 500 km north from New Zealand. In the frames I took, the CME can be discerned. Then, I concluded transverse velocity of the CME was 220–580 km/s and the transverse acceleration was 2.5–3.7 km/s².