

平成11年8月11日の皆既日食による太陽コロナと地球磁気圏の観測

Observations of the Solar Corona and the Magnetosphere
at the Total Eclipse of 1999 August 11

研究成果報告書

研究組織：

研究代表者：

(平成11年度) 国立天文台・太陽物理学研究系・教授 桜井 隆
(平成12年度) 国立天文台・太陽物理学研究系・助教授 一本 潔

研究分担者

桜井 隆 国立天文台・太陽物理学研究系・教授 (平成12年度)
一本 潔 国立天文台・太陽物理学研究系・助教授 (平成11年度)
黒河宏企 京都大学・理学研究科・教授
北井礼三郎 京都大学・理学研究科・助教授
上野 悟 京都大学・理学研究科・助手
湯元清文 九州大学・理学研究科・教授
立原裕司 九州大学・理学研究科・助手
(現職：宇宙開発事業団・地球観測システム本部・副主任開発部員)
篠原 学 日本学術振興会特別研究員 (九州大学・理学研究科)
(現職：名古屋大学太陽地球環境研究所・COE 研究員)

研究協力者

田中伸幸 国立天文台・乗鞍コロナ観測所・技官
篠田一也 国立天文台・乗鞍コロナ観測所・技官
武田 秋 京都大学・理学部・教務補佐員
(現職：Solar Physics Research Corporation)
田中良昌 九州大学・理学研究科・大学院生

研究経費

平成11年度 9400千円
平成12年度 700千円

1. 本研究の目的

1999年(平成11年)8月11日にヨーロッパから中近東にかけて、20世紀最後の皆既日食があった。皆既の時間は最大で2分以上あり、また皆既帯が砂漠や海だけでなく人間の居住する地域も通るため、交通があまり不便でなくかつ晴天確率の高い観測地点を選ぶことができるという好条件があり、早くから全世界的に観測計画が練られた。我が国でも国立天文台、京都大学、九州大学が観測計画を立案し、本研究費補助金の配分を得て観測を実施した。我々の研究目的は以下のようにまとめられる。

- (1) 太陽コロナは数百万度の高温プラズマであるが、その高温の原因は依然として謎であり、天体物理学の重要研究課題の一つとなっている。コロナの加熱には磁場が重要な働きをしていることは確実であるため、コロナ中の微細磁気ループ構造とその時間変化を詳しく調べる事により、コロナの加熱機構を特定する鍵が得られると期待できる。
- (2) 太陽コロナはその高温のために太陽の引力ではつなぎ止めることができず「太陽風」となって地球付近まで流れている。しかしそのスピードは単に高温というだけでは説明できない速さで、未知の加速機構が働いていると考えられているものの、その詳細は未だ不明である。太陽近傍での太陽風の速度をコロナの分光観測から求め、太陽風の加速機構の謎に一步迫ることができる。
- (3) 太陽風は地球磁気圏と相互作用して、電磁流体(ULF)波動を磁気圏境界層の上流側に励起している。このULF波動は磁気圏内部に侵入・伝播し、南北両半球の電離層を繋いでいる地球の磁力線と結合共鳴振動している。この磁力線の共鳴振動の特性は電離層の電気伝導度に左右されているが、その電離層効果の詳細は未だ十分に解明されていない。今回の皆既日食帯は西欧と南アフリカを繋ぐ磁力線の根元付近を横切ることから、北と南半球で陰と日照になった電離層の状態を比較でき、貴重なデータが得られると期待できる。

テーマ(1)を京都大学班、テーマ(2)を国立天文台班、テーマ(3)を九州大学班が担当し、太陽コロナから太陽風、そして地球磁気圏までを含む大きなシステム全体を対象とする極めて野心的な研究計画となっている。

2. 本研究課題にいたる経緯

- (1) 京都大学では、1980年のケニヤ日食、1991年メキシコ日食において、それぞれその当時に世界最高の空間分解能を持つコロナループ像の観測に成功して、重要な成果を挙げて来た。コロナの緑色輝線(13階電離の鉄イオンによる、200万度のプラズマからの放射)と赤色輝線(9階電離の鉄イオンによる、100万度のプラズマからの放射)を比較し、温度分布の不均一性、100万度成分と200万度成分の位置関係について研究した結果、2つの成分の関係は、単純に排他的とも、同軸ケーブルの芯と被覆のように重畳しているともいえず、さらに分解能の高い、広い温度範囲の観測が必要であることを示した。この結果を受け今回の観測では、より高い分解能を目指すため、レンズ及びフィルター等基本光学システムは前回と同様のものを用いるが、カメラのピクセルサイズを小さくする等の改良を加えた。また「ようこう」やSOHO衛星のX線・紫外線画像が同時に得られることも今までにない利点である。
- (2) 国立天文台は1994年11月3日の南米での皆既日食の際に観測隊をチリ国に派遣してコロナの精密分光観測を実施した。小型分光器により、コロナの自由電子の散乱によりほとんどスペクトル線が見えなくなっている太陽光球・彩層のスペクトルを観測し、スペクトル線の痕跡であるわずかな窪みの深さから太陽コロナの温度を導出した。この方法では最も少な

い仮定の下にコロナの電子温度を直接求めることができる。この観測の成功は世界で最初のもので、高く評価されている。今回は更に観測機器を改良し、コロナの様々な場所、特にコロナ・ホールのような太陽風の吹き出し口と考えられている部分と、閉じた磁場構造の部分の温度の差、太陽風の速度を求めることを目指した。

- (3) 九州大学のグループは永年、ミクロネシア諸島、インド、アフリカ、南米の磁気赤道域を中心に展開した地磁気観測ネットワークを実施して、海外での地磁気観測の十分な経験と知識を有している。長周期変動から突発的な地磁気微小変動までを含む広範囲の観測研究を行っており、特に、本研究に関わる、昼側によく発生する10～80秒のULF波動については、極域から赤道域への侵入・伝播過程の形態学的な波動特性について精力的に研究を進めてきた。皆既日食による電離層の変化について最近では、1995年10月25日の西太平洋域での皆既日食で、地磁気日変化に重畳した数時間程度の変化が研究された。しかし数10秒の短周期ULF波動の研究は、1960年代の東北大学の加藤教授グループの日食観測以来ほとんどなされていない状況にある。最近のGPS衛星信号を用いた時刻精度の発展により、多点間の時刻精度を1秒以下に抑えることが可能になり、今回初めて日食時のULF波動の発生・伝播特性について決定的な解析研究ができる状況になった。日食期間中に発生するULF波動が昼側・夜側起源かそれとも日食時固有に発生したものかを明らかにできる条件が整っている。

3. 今回の皆既日食の基礎データ

出典 : F.Espenak and J.Anderson, Total Solar Eclipse of 1999 August 11, NASA Reference Publication 1398 (1997)

3.1 日食の基礎パラメータ

ELEMENTS OF THE TOTAL SOLAR ECLIPSE OF 1999 AUGUST 11

Geocentric Conjunction 10:52:16.66 TDT J.D. = 2451401.952971
of Sun & Moon in R.A.: (=10:51:12.06 UT)

Instant of 11:04:09.01 TDT J.D. = 2451401.961215
Greatest Eclipse: (=11:03:04.41 UT)

Geocentric Coordinates of Sun & Moon at Greatest Eclipse (DE200/LE200):

<u>Sun:</u>	R.A. = 09h23m08.297s	<u>Moon:</u>	R.A. = 09h23m34.531s
	Dec. = +15°19'39.72"		Dec. = +15°48'38.51"
	Semi-Diameter = 15'46.77"		Semi-Diameter = 16'00.34"
	Eq.Hor.Par. = 8.68"		Eq.Hor.Par. = 0°58'44.24"
	Δ R.A. = 9.467s/h		Δ R.A. = 142.037s/h
	Δ Dec. = -44.35"/h		Δ Dec. = -462.21"/h

<u>Lunar Radius</u>	k1 = 0.2725076 (Penumbra)	<u>Shift in</u>	Δb = 0.00"
<u>Constants:</u>	k2 = 0.2722810 (Umbra)	<u>Lunar Position:</u>	Δl = 0.00"

<u>Geocentric Libration:</u>	l = 4.8°	Brown Lun. No. = 1232
(Optical + Physical)	b = -0.8°	Saros Series = 145 (21/77)
	c = 19.7°	Ephemeris = (DE200/LE200)

Eclipse Magnitude = 1.02859 Gamma = 0.50623 ΔT = 64.6 s

3.2 エラジー (トルコ) における日食の基本量

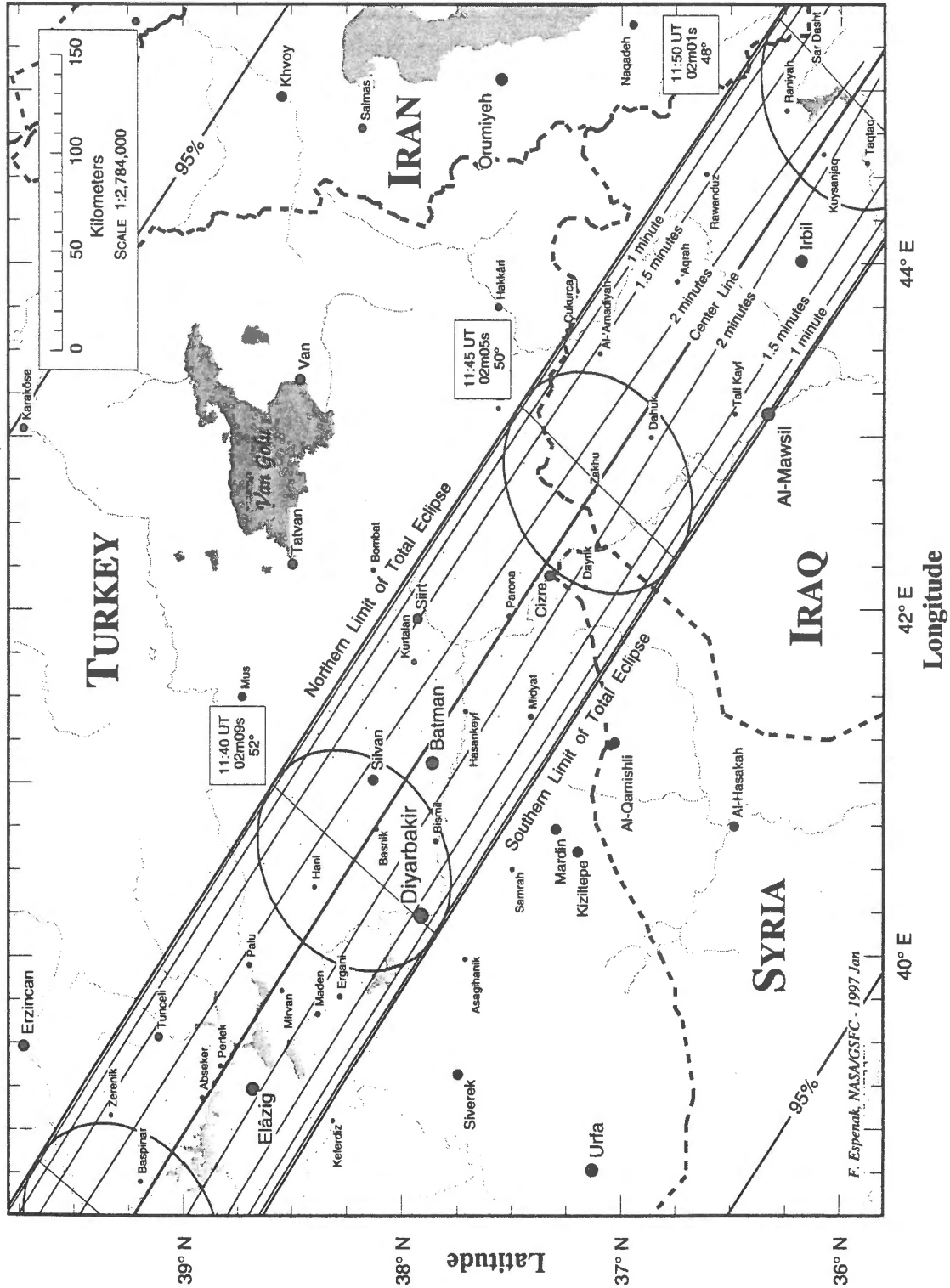
Elazig latitude 38°41' N longitude 39°14' E

	UT	position angle	altitude
first contact	10:12:32.9	292	65
second contact	11:36:13.8	131	
maximum eclipse	11:37:15.9	22	53
third contact	11:38:17.6	273	
fourth contact	12:54:02.2	111	39
eclipse magnitude	1.027		
duration of totality	02m04s		

3.3 トルコ東部を通過する皆既帯

Total Solar Eclipse of 1999 August 11

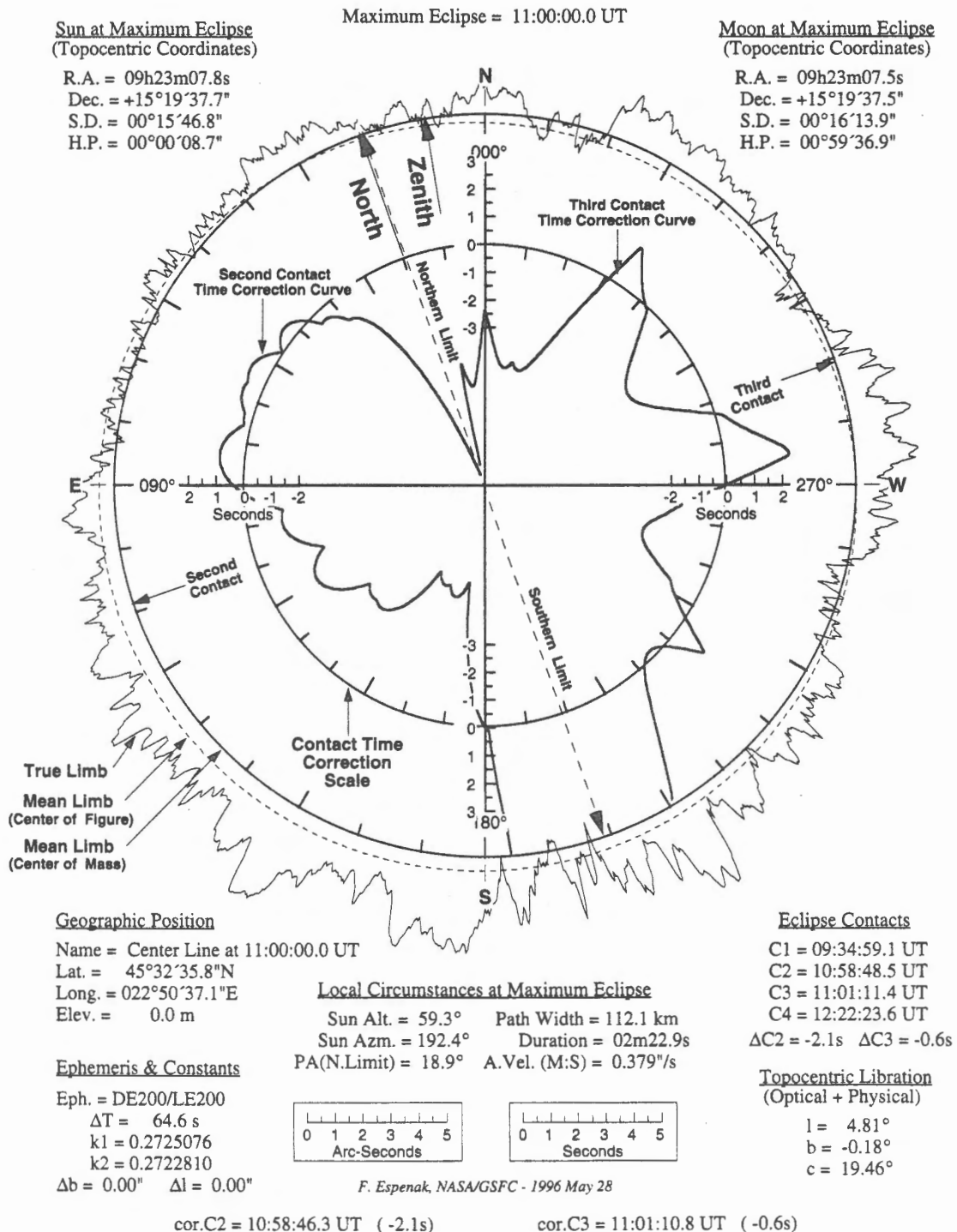
FIGURE 12: THE ECLIPSE PATH THROUGH TURKEY, SYRIA AND IRAQ



3.4 8月11日世界時11時における月縁

Total Solar Eclipse of 1999 August 11

FIGURE 20: THE LUNAR LIMB PROFILE AT 11:00 UT



3.5 8月11日世界時11時における天体の配置

Total Solar Eclipse of 1999 August 11

FIGURE 25: THE SKY DURING TOTALITY AS SEEN FROM CENTER LINE AT 11:00 UT

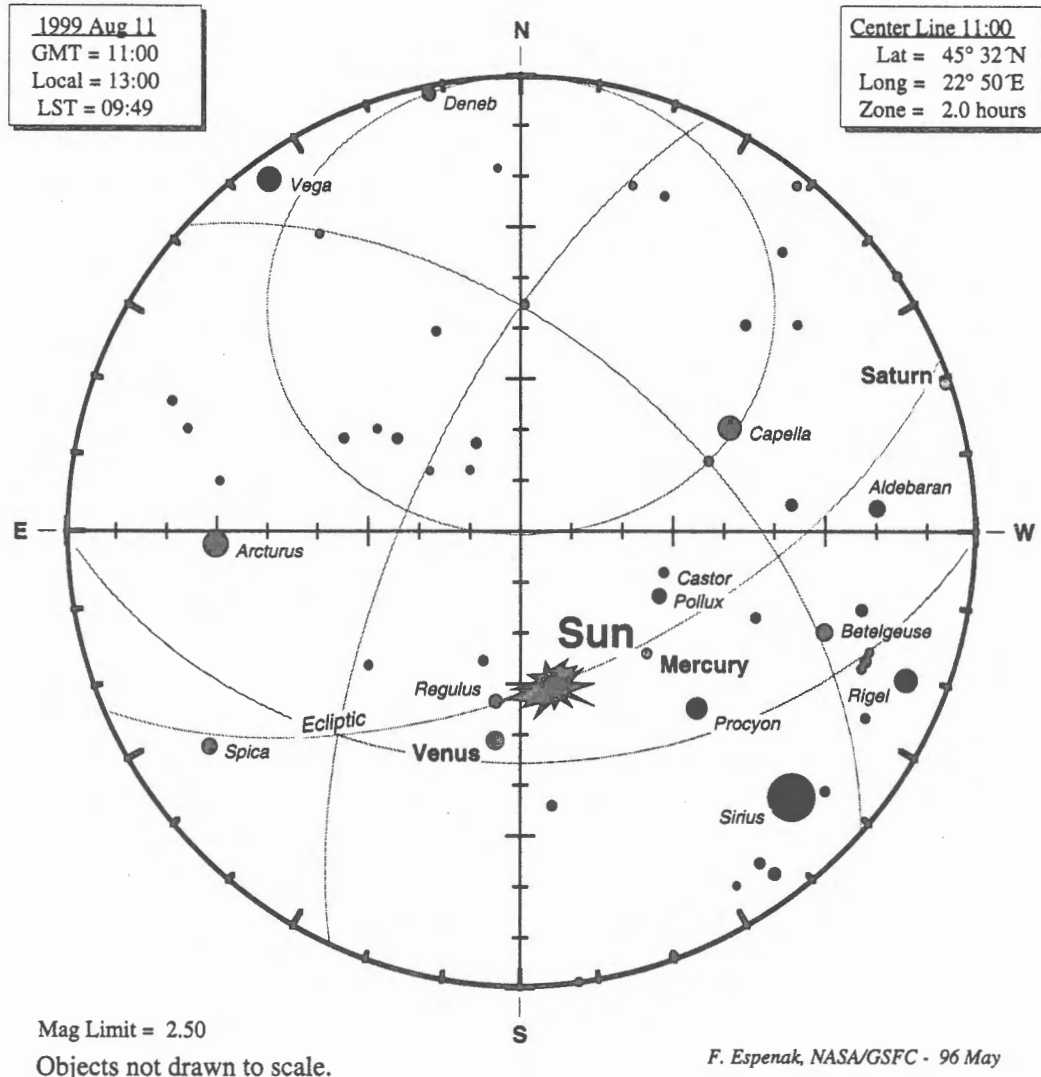


Figure 25: The sky during totality as seen from the center line in Romania at 11:00 UT. Venus ($m=-3.5$) will be the most conspicuous planet located 15° east of the Sun. Mercury ($m=+0.7$) should also be visible 18° west of the Sun. The southwestern sky will be dominated by the bright stars of winter, including Capella ($m=+0.08$), Aldebaran ($m=+0.85$), Procyon ($+0.38$), Betelgeuse ($+0.5$), and Sirius ($m=-1.46$). Other bright stars which may also be visible include Spica ($m=+1.0$), Arcturus ($m=-0.04$), and Regulus ($m=+1.35$).

For sky maps from other locations along the path of totality, see the special 1999 eclipse web site:
<http://planets.gsfc.nasa.gov/eclipse/TSE1999/TSE1999.html>

4. 各観測班の旅行日程と活動（平成11年度）

4.1 京都大学班

上野 悟、武田 秋

7月31日	関西空港発 イスタンブール（トルコ）着
8月1日	イスタンブール発 エラジー（トルコ）着
8月2日～8月12日	エラジー市ハーブットにおいて日食観測の準備と実施
8月13日	エラジー発 イスタンブール（トルコ）着
8月14日	イスタンブール工科大学にて研究発表
8月15日	イスタンブール発
8月16日	関西空港着

4.2 国立天文台班

一本潔、田中伸幸、篠田一也

7月31日	成田空港発 イスタンブール（トルコ）着
8月1日	イスタンブール発 エラジー（トルコ）着
8月1日～8月12日	エラジー市ハーブットにおいて日食観測の準備と実施
8月12日	エラジー発 イスタンブール（トルコ）着
8月13日	イスタンブール工科大学にて研究発表
8月14日	イスタンブール発
8月15日	成田空港着

4.3 九州大学班

湯元清文

7月24日	福岡空港発 バーミンガム（イギリス）着
7月25日～7月28日	バーミンガム大学において打ち合わせ
7月29日	バーミンガム発 ローマ（イタリア）着
7月30日～8月2日	イタリア地球物理観測所ラキーラ観測所に地磁気観測装置設置
8月3日	ローマ発ブダペスト（ハンガリー）着
8月4日～8月6日	ナジャチェンク観測所に地磁気観測装置設置
8月7日	ブダペスト発
8月8日	福岡空港着

立原裕司

7月16日 福岡空港発 バーミンガム(イギリス)着
7月17日～7月21日 バーミンガム大学において打ち合わせ
7月22日 バーミンガム発 ハートランド(イギリス)着
7月23日～7月24日 英国地質調査所ハートランド観測所に地磁気観測装置設置
7月25日 ハートランド発 パリ(フランス)着
7月26日 パリ大学においてアフリカでの地磁気観測打ち合わせ
7月27日 パリ発
7月28日 ガロア(カメルーン)着
7月29日～8月4日 カメルーン地質調査所に地磁気観測装置設置
8月5日 ガロア発 マロア(カメルーン)着
8月6日～8月8日 モコロ観測所において旧式磁力計の撤去
8月9日 マロア発
8月10日 パリ(フランス)着
8月11日 パリ大学においてアフリカでの地磁気観測報告
8月12日 パリ発
8月13日 福岡空港着

篠原 学

7月22日 福岡空港発 ハートランド(イギリス)着
7月23日～7月24日 英国地質調査所ハートランド観測所に地磁気観測装置設置
7月25日 ハートランド発 バーミンガム(イギリス)着
7月26日～7月28日 バーミンガム大学において打ち合わせ
7月29日 バーミンガム発
7月30日 ケープタウン(南アフリカ共和国)着
7月31日～8月4日 ハーマナス観測所に地磁気観測装置設置
8月5日 ケープタウン発
8月6日 ブタペスト(ハンガリー)着
8月7日～8月15日 ナジャチェンク観測所において地磁気観測
8月16日 ブダペスト発 ハートランド(イギリス)着
8月17日～8月20日 英国地質調査所ハートランド観測所の地磁気観測装置撤収
8月21日 ハートランド発
8月23日 福岡空港着

田中良昌

7月24日 福岡空港発 バーミンガム(イギリス)着
7月25日～7月28日 バーミンガム大学において打ち合わせ
7月29日 バーミンガム発 ローマ(イタリア)着
7月30日～8月2日 イタリア地球物理観測所ラキーラ観測所に地磁気観測装置設置
8月3日 ローマ発ブダペスト(ハンガリー)着
8月4日～8月15日 ナジャチェンク観測所において地磁気観測
8月16日 ブダペスト発 ハートランド(イギリス)着
8月17日～8月20日 英国地質調査所ハートランド観測所の地磁気観測装置撤収
8月21日 ハートランド発
8月23日 福岡空港着

5. 研究結果の概要

京都大学班は、口径 15cm 屈折望遠鏡接眼部に、4種のフィルターを切替え可能なターレット型装置を取付け、更に 400 万画素 1024 階調の高性能 CCD カメラを用いて、1 秒角という比較的高空間分解能を満たす 3 種類の異なる温度におけるコロナ構造のイメージの撮影に成功した。高感度の CCD カメラを導入した事により、2 分 10 秒という短い皆既時間における多波長観測にも拘わらず、太陽表面から約 0.3 太陽半径の高さにまで至る温度密度情報を含むコロナの細密構造と、ほぼ太陽半径に相当する高さに至るまでの連続光による大規模なコロナ物質の分布を検出する事ができた。また、今までの皆既日食観測とは違い、今回は X 線・紫外線など、異なる様々な種類の波長用望遠鏡を搭載した複数の人工衛星も我々と同じコロナ中領域を観測しており、今後これらと併せて解析を進行させることにより、コロナガスの約 1 万度から 500 万度程度にまで渡る、広範囲の連続的な温度構造分布を明らかにする事が可能となる。

国立天文台班は太陽の北極域のコロナをターゲットにして、波長 3600-4700 Å におけるスリット分光観測を試み、リムから 3 太陽半径にまでわたる数点の異なる高さにおいて 8 枚の良好なスペクトルを取得することに成功した。連続光スペクトルの形状からコロナ電子温度の高さ分布がわかり、また同時にスペクトルの波長変移より、太陽風の速度、加速の様子をとらえることができる。当初の目標は極域コロナホールを観測であったが、太陽活動極大期に近づいたため、当日は極域にもストリーマが見られた。感度補正、波長較正、K/F/E スペクトル分離などの一次的な解析を行い、コロナの底部において電子温度 200 万度という、極域の温度としてはやや高めの結果を得たが、これはストリーマの存在のためと思われる。

九州大学班は 8 月 11 日の皆既日食の日をはさんで前後 2 週間に地磁気の 5 点観測を実施した。電離層効果を調べるために、皆既日食の軌道沿いにある英国のハートランド、ハンガリーのナジャチェンク地磁気観測所とその磁気共役点に近い南アフリカ連邦のハーマナス地磁気観測所に高感度、高精度の磁力計を設置した。更に、変動磁場の緯度効果をみるために、イタリアのラキーラ観測所と太陽風上流側からの ULF 波動の中で地球磁場を横切り赤道域まで侵入・伝播出来る磁気音波モードのみを抽出するために、ガロアの磁気赤道域に磁力計を設置した。北半球の皆既日食の陰による数時間の磁場変動 (Kato et al., 1965) の発生がナジャチェンク、ラキーラで追認できた。この現象は、日食下で電離層電気伝導度が減少し S_q 電流が減少した為であると解釈される。このような現象はハートランドでは確認されなかったが、これはハートランドが日食時にたまたま S_q 電流系の渦の中心付近に位置しており電流自体が小さかった為、電流の減少が観測にかからなかったのではないかと推量される。また、皆既帯のほぼ磁気共役点に位置するハーマナスでは、日食に伴う地磁気変動が検出されなかった。この新しい観測事実は、数時間の磁場変動を引き起こす日食時の電離層電気伝導度などの変化は、反対半球に影響が伝わらない、即ち、皆既日食が起こっている片側半球の電離層内で閉じた電流系が形成され、沿磁力線電流として反対半球に流れない物理作用が地球電磁圏で起こっていることを示唆する結果である。

6. 謝辞

今回の日食観測では、当研究課題の参加者のほか、大学関係では明星大学が観測隊をトルコに派遣し、国立天文台、京都大学と同じ観測地点において観測を実施した。日本国内での準備や現地での作業における協力に感謝したい。

各研究機関間の打ち合わせ、ならびに観測地の天候予測などについては、日本学術会議国際共同観測専門委員会日食分科会のもとで、当研究課題参加機関の他、気象庁、海上保安庁水路部などの協力を得て行われた。

トルコへの観測隊の派遣に関しては、日本国外務省および在日本トルコ大使館より、当地での治安状態などの情報を提供いただいた。また、観測地の選定、設営につき、トルコの Kandilli Observatory より支援をいただいた。ここに感謝したい。

7. 学会発表、出版論文リスト

学会発表

- 湯元清文、立原裕司、篠原 学、田中良昌、Vero J.、Wesztergom V.、Sutcliffe P.R.、Meloni A.、Palangio P.、Toteu S.F.: 「1999年8月11日皆既日食の地磁気多点同時観測 -速報-」, 地球電磁気・地球惑星圏学会(平成11年11月9日~12日、仙台市民会館) A22-P102
- 武田 秋、上野 悟、黒河宏企、北井礼三郎: 「1999年8月11日の皆既日食における内部コロナの温度構造について」、日本天文学会年会(平成13年3月26日~28日、千葉大学)

研究発表

- Hara, H., and Ichimoto, K.: 'Microscopic Nonthermal Plasma Motions of Coronal Loops in a Solar Active Region', *Astrophys. J.*, 513, 969 - 982, 1999
- Ichimoto, K., Kumagai, K., Sano, I., Kobiki, T., Sakurai, T., and Munoz, A.: 'Measurement of Coronal Electron Temperature at the Total Eclipse on 1994 November 3', *Publ. Astron. Soc. Japan*, 48, 545-554, 1996
- Ichimoto, K., Noguchi, M., Tanaka, N., Kumagai, K., Shinoda, K., Nishino, T., Fukuda, T., Sakurai, T., and Takeyama, N.: 'A New Imaging System of the Corona at Norikura', *Publ. Astron. Soc. Japan*, 5, 383 - 391, 1999
- Sakurai, T., Irie, M., Imai, H., Miyazaki, H., and Sykora, J.: 'Emission Line Intensities of the Solar Corona and Sky Brightness Observed at Norikura: 1950-1997', *Publ. Natl. Astron. Obs. Japan*, 5, 121 - 137, 1999
- Sakurai, T., and Shin, J.: 'Determination of the Point Spread Function of Yohkoh Soft X-ray Telescope', *Adv. Sp. Res.*, 25(9), 1761 - 1764, 2000
- Singh, J., Ichimoto, K., Imai, H., Sakurai, T., and Takeda, A.: 'Spectroscopic Studies of the Solar Corona', *Publ. Astron. Soc. Japan*, 51, 269 - 276, 1999
- Takeda, A., Kurokawa, H., Kitai, R., and Ishiura, K.: 'Contribution and Properties of the Green- and Red-Line Coronal Loops in the K-Corona', *Publ. Astron. Soc. Japan*, 52, 375-391, 2000
- Takeda, A., Kurokawa, H., Kitai, R., and Ishiura, K.: 'Density Structure of the Coronal Loops Derived from the 1991 Total Eclipse Observation', *Proceedings of the Last Total Solar Eclipse of the Millenium in Turkey*, eds. W. Livingston and A. Ozguc, ASP Conference Series, vol.205, pp.113-120, 2000
- Wang, H.N., Sakurai, T., and Yan, Y.: 'Enhanced Coronal Heating and 3D Solar Magnetic Fields in AR 7321', *Adv. Sp. Res.*, 25(9), 1769 - 1772, 2000

8. 京都大学班

1999年8月11日トルコ皆既日食観測：京都大学チーム結果報告

上野 悟、武田 秋

概要

1999年8月11日に、ヨーロッパから中近東にかけて、20世紀最後の皆既日食が見られた。我々京都大学は、学術振興会の平成11年度国際学術研究補助金の援助を受け、観測者2名が国立天文台チームと共にトルコ、エラジー市に赴き、太陽コロナの広視野に渡る微細構造・温度密度構造のデジタル観測に挑んだ。以下に、今回の観測の目的、観測装置・システム、試験観測内容、実際の観測内容、そしてその結果得られたデータの概要などを記す。

8.1 今回の日食観測の目的

太陽コロナは数百万度の高温プラズマであり、この加熱には磁場が重要な働きをしていることが現在までの太陽物理学研究により確実となってきている。従って、コロナ中の微細磁気ループ構造とその時間変化を詳しく調べる事が、その具体的な加熱機構を解明する上で強く必要とされている。

そこで今回は、高山に設置されたコロナグラフなどで観測する場合よりもさらに1000分の1の暗い散乱光の下でコロナが観測可能な皆既日食を利用し、100万度、200万度、350万度のコロナ輝線像と連続光像を撮影する事による、コロナループの温度密度構造を求めるための観測を行なった。

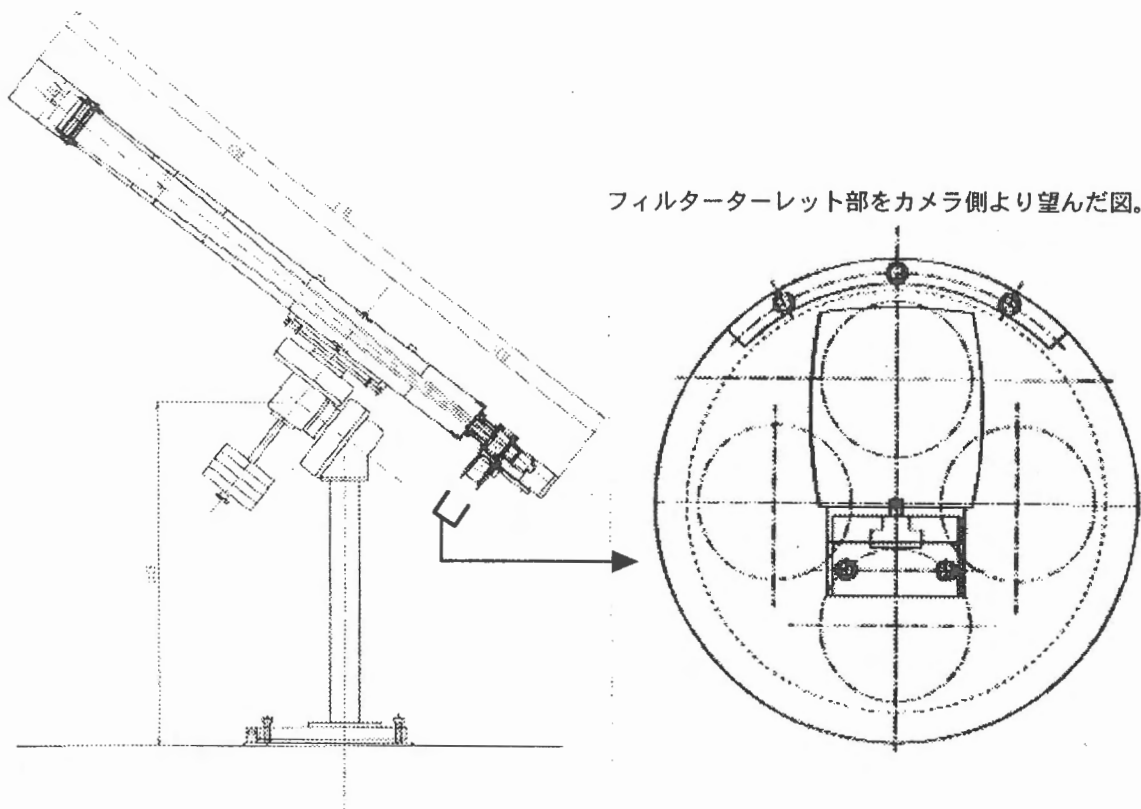
当観測において、京都大学チームとしては初めてデジタルCCDカメラを日食観測に導入し、過去に比べてより測光精度が良く、露出時間も短時間で済む装置システムを用意した。また、このCCDカメラも、チップ受光面積の極力大きなものを使用し、高空間分解能を保ちつつ広い視野を確保し、現在のコロナ観測用人工衛星などがカバーしていない、高度のより高いコロナ領域の情報をも観測できる様、工夫した。

一方、上記人工衛星などによる、紫外線・X線など様々な他波長電磁波で観測された内部コロナの同一領域の観測データと併せて比較解析する事により、より温度方向についても連続的で幅広い情報を得る事ができるものと期待できる。これら人工衛星群は、我々京都大学チームが前回1991年の皆既日食で観測を行なった当時にはまだ実在していなかったものばかりであるので、今回のこの比較解析から導かれる結果は大変意義深いものになるであろう。

8.2 観測装置・システム

今回使用した日食観測用望遠鏡（西村製作所製）の概観を図8.1に示す。

口径は15cm、F比が15、焦点距離2250mmという内容で、焦点面には直径約18mmの太陽像ができるよう、設計している。一方、上記3種類の温度に対応する輝線波長画像を撮影できるフィルター3つと、連続光フィルターの計4種のフィルターは、CCDカメラの直前にターレット状のフィルターホルダーを設置し、その中に装着する事により、随時互いに交換可能（手動）な形



フィルターターレット部をカメラ側より望んだ図。

図 8.1 日食観測望遠鏡とフィルターターレット部。

式を採った。ただ、これはつまり異なる波長フィルターのイメージを同時に撮影する事はできない事を意味しており、前回91年の京都大学チームの観測装置（各フィルターに対し各々鏡筒を用意した）に対するデメリットではある。

下にこれら4つのフィルターの特性を簡単に紹介した表を示す（表 8.1）。

表 8.1 使用した4フィルターの特性。

中心波長 (Å)	透過幅 (Å)	対応する 元素等	対応するコロナ の温度 (K)	フィルターの 種類
5302.9	2.0	Fe XIV	2.0×10^6	Fabry-Perot
6374.5	3.2	Fe X	1.0×10^6	Fabry-Perot
5694.5	2.1	Ca XV	3.5×10^6	Fabry-Perot
6100	61	Continuum	—	Dielectric multi-layered

そして、これらの光学系を通じてできたコロナ像を撮影するCCDカメラは、Kodak製 MegaPlus4.2i、2040 × 2040 pixel（15℃に保った水を循環させる水冷式）を使用した。1 pixelの大きさが約9 μmであるので、チップ全体の大きさがほぼ18 mm四方と、太陽直径に匹敵する。（実際にできる太陽像直径は挿入するフィルターによって多少サイズに差異は生ずる。）従って、イメージの空間ピクセル分解能は、約0.9秒角/pixelということになる。また、強度の階調は当観測においては

8ビット256階調を採用してある。さらに、このCCDカメラはPC (DELL OptiPlex) によって制御され、その制御アプリケーションにおいては、撮影前に4フィルター分まとめて露出時間・撮影枚数の組み合わせをセットしておく事ができ、観測者は、各フレームの撮影開始時のタイミングだけをマウス操作によりPCに入力してやることにより、撮影・データの保存が順次進めて行ける仕組みになっている。

8.3 日本における事前の試験観測

現地に向かうまでの主に5～7月の間には、京都大学花山天文台にて様々な事前準備・試験観測を行なった。それらの主な内容は、

- a) 望遠鏡等機材設営・解体作業演習
- b) 極軸調整プロセスの検討
- c) 各フィルター別焦点位置決め観測
- d) 各フィルター別適正露出決め観測
- e) 各Fabry-Perot フィルターの性能テスト

などが挙げられる。

特にc、dの焦点、露出決めは、日々観測結果が環境に応じて変動したり、求めるコロナの明るさの真の基準が存在しない困難さ等から、望遠鏡対物レンズを開放しての月面の観測、2つの穴を開けた絞り蓋やNDフィルターを付けた上での太陽の観測等を長時間掛け、何度も繰り返した上での平均的値を出す事を行なった。

また、eのフィルター性能検定では、既存および新規購入のフィルターに対し、公称通りの特性（透過率・透過幅・有効口径など）が保たれているか、飛騨天文台DSTの水平分光器、花山天文台シーロスタットの分光器を用いて検定を行なった。特に透過中心波長の温度依存性を重点的に調べて、データの信頼度の向上に努めた。

8.4 現地での観測概要

今回の日食は、皆既帯が西はイギリス、フランスから、東はパキスタン、インド辺りまでの非常に広い範囲に渡って覆っている、特徴的な日食であった。しかしながら、東に行けば行く程晴天率が高くなる事や、ルーマニア近辺を中心に、東西に離れるほど皆既継続時間が短くなってしまふ事などを考慮し、我々はトルコ国内の何処かが観測に最適であると判断をし、1998年の8月に、トルコ国内でも特に晴天率の良い東アナトリア地方の現地調査をすでに行なっていた。その調査結果や、LOCチーフのアドバイス、さらに治安状況などを鑑み、最終的に皆既帯中心に近い中規模地方都市、エラジー郊外の、ハルプット丘陵地を観測地として選択した。

さて、我々観測チームは皆既日食10日前の8月1日にトルコ、エラジー市現地入りをし、事前準備を進め、4日には観測地点を最終決定し、望遠鏡、周辺機器の設営を行ない、それ以降、再び現地における焦点・露出試験観測や予行演習を繰り返し、11日の当日を迎えた。

ちなみに観測現場に設置された状態の望遠鏡全景、カメラ制御機器周辺の様子は図8.2の写真の通りである。

当日の早朝、日本残留の京都大学チームとの打ち合わせの結果、当日紫外線人工衛星TRACEが観測対象領域としており、飛騨天文台においてもプロミネンスが観測された、太陽の縁上真西付近から北極近くに渡る領域が今回の皆既日食における観測領域として決定された。

日食は西側より月が太陽を覆って行くため、ターゲットが西側のリムである場合、部分日食開始後、皆既までの間は観測領域が月に隠されて確認することができないので、部分日食前に視野内にターゲット領域を一旦導入した後は視野を動かすことはできない。従って、皆既日食前の部



図 8.2 観測現場における望遠鏡・制御システムの概観.

分日食の撮影は行なうことはしなかった。その後、皆既が始まると同時に、前日までに決定した撮影プログラムを始動させ、結局、各フィルター毎に表 8.2 のような内容のデータを取得するに至った（今回の日食の皆既時間は約 2 分 8 秒と、比較的短時間でしかなく、その時間帯の中で 4 フィルター各々を交換しつつ撮影する必要がある事を鑑みると、表 8.2 で示したデータ量は、最新の電子技術を利用したデジタル CCD カメラを利用した事によってこそ、もたらされたものであると言える事ができる）。更にその皆既終了後はコロナの輝度の比較参照データとして部分日食の全体像を部分食終了時まで断続的に撮影し、一連の観測は終了した。

表 8.2 フィルター別露出時間と撮影フレーム数.

Continuum (6100 Å) Nikon		Green (5302.9 Å) Andover		Red (6374.5 Å) Daystar		Yellow (5694.5 Å) Andover	
露出時間 (ms)	枚数	露出時間 (ms)	枚数	露出時間 (ms)	枚数	露出時間 (ms)	枚数
10	2	100	2	100	2	10	2
20	2	200	2	200	2	10	2
50	2	400	2	400	2	10	2
100	1	800	1	800	1	2000	1
200	1	2000	1	2000	1	8000	1

8.5 初期解析

8.5.1 データの量と質

今回の観測は、1991年のメキシコ日食とほぼ同じ内容であったが、望遠鏡が前回の4連筒型に比べてコンパクトになり、皆既継続時間も短かったことから、コロナの撮像枚数はメキシコ日食(200枚以上)を大幅に下回った。しかし今回は大容量CCDの利用により、較正用のダーク、フラット(青空像)、部分日食像を含めて保存を要するデータの容量は1.5GBを越える。全データがデジタルであること、露光と観測強度の線形性が保証されていること、それらを扱う計算機環境が進歩したことによって、データの精度と操作性は大きく向上したと言える。

フィルタを通したことによる各波長ごとの空間分解能の差については、取得したコロナ画像の月縁を円近似した場合のピクセル数と日食当日の月視半径とを比較して決定した。参考のため、各波長のコロナ像における月半径(960.34")のピクセル数とそこから導かれる分解能を表8.3に示す。

表 8.3 画像上の月半径と分解能。

中心波長 (Å)	月半径 (pix)	空間分解能 (arcsec/pix)
5302.9	1020	0.94
6374.5	1014	0.95
5694.5	966	0.99
6100	998	0.96

ただし、今回のような約太陽四半球の視野では、円近似で半径を決定することは難しく、1~2%程度の不定性が残る。また、以降の解析では、すべての波長において分解能が1.0 arcsec/pixとなるよう画像の規格化を行なった。この値は、観測光学系の空間分解能の理論値(約1 arcsec)に対して釣合いのとれたものになっている。

8.5.2 位置合わせ

前回(1991年)の観測は、4連筒望遠鏡による多波長同時観測が目玉であった。同時刻のデータを取得することができた反面、個別の検出器(フィルム)を用いたことにより、位置合わせのためには回転方向の補正が不可欠であった。今回は、単一の光学系を経た光を同じCCDで検出するため、この補正がほぼ不要なことが利点である。前回と同様に月縁の形状を利用して観測領域のPA(Position Angle)を決定し、第2、第3接触のPAと時刻から各画像の取得時間における月縁の位置を計算して位置を合わせる事が可能である。ただし、現時点ではまだ計算の精度が粗く、満足な結果が得られていないので、以下に紹介するコロナ画像では、位置は月縁が重なるよう合わせている。

8.6 初期解析の結果

図8.3に今回得られたコロナ輝線と連続光強度の空間分布を示す。(a)の5302.9 Åは、可視域で最も強いコロナ輝線であり、約200万度のプラズマの分布を反映している。ループ構造が多く見られるが、あまり明瞭ではなく、太くぼんやりしたものが多い。(b)の6374.5 Åは、5302.9 Åに次ぐ強度を持ち、約100万度のプラズマの分布を代表している。(a)に比べて細く明瞭なループ構造が多いのが特徴的である。これに対して(c)の連続光画像においては、光球光のコロナ電子によ

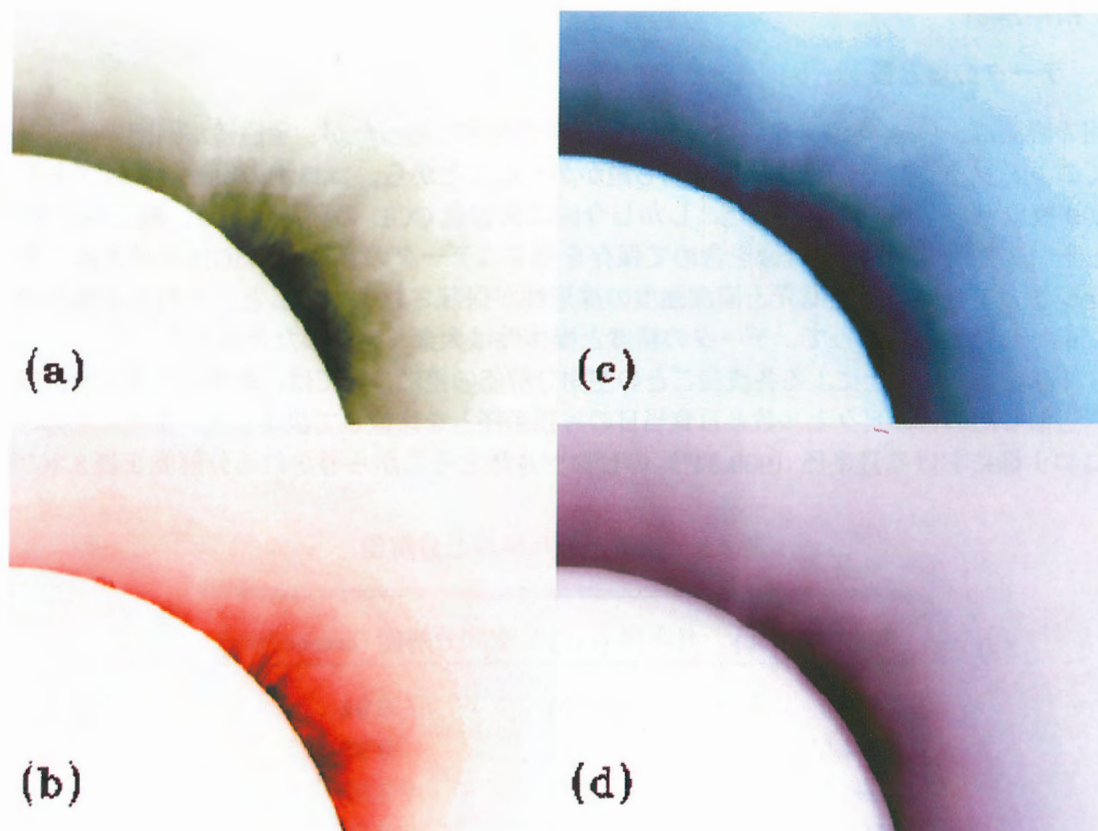


図 8.3 1999 年 8 月 11 日に観測された太陽北西縁上空のコロナ. (a) 波長 5303.3 Å、(b) 6374.5 Å、(c) 連続光、(d) 5694.5 Å. 連続光成分差し引き前.

るトムソン散乱の成分が卓越しており、全密度の指標となっている。すべての温度成分を含むため、ループなどの構造が見えにくい。最後に (d) は、約 350 万度のプラズマの発するコロナ輝線 (5694.5 Å) を含む波長域で撮像したものである。強度分布は連続光のものと酷似しており、フィルタの透過幅に含まれる連続光成分が強度の殆んどを占めていると思われる。厳密には、絶対強度を算出して定量的な判断を下す必要があるが、今のところ輝線特有の構造は見当たらない。以上の輝線と連続光におけるコロナの形態学的な特徴は、1991 年の観測結果とよく一致している。

図 8.4 は、強度画像に対して OMC (Octo-directional Maxima of Convexities) アルゴリズムを用いた画像処理を施し、構造を強調したものである。図 8.3 では目立った構造の見えなかった連続光コロナも多数のループ構造から成り立っていることがわかる。また、このように構造を強調することにより、各波長間でループの分布の違いがあるかを明確に示すことが可能となる。暫定的な位置合わせの後の比較から、次のような傾向が得られた。5302.9 Å (200 万度) と 6374.5 Å (100 万度) のループの軸位置は、明らかにずれているものが多い。連続光のループの多くは、5302.9 Å (200 万度) のループと一致するものが殆んどを占めるが、6374.5 Å (100 万度) で見える非常に明るいループに関しては、連続光ループに対応物を見つけることができる。ループの分布に関するこれらの傾向も、メキシコ日食の解析結果と同様である。ただ、前回 5302.9 Å と 6374.5 Å の輝線で見られたループは、非常に良く似た形状のものが相接するように並んでいるのが目立ったのに対し、今回の両波長のループは、相似なものがあまり多くない、というのが特徴的である。

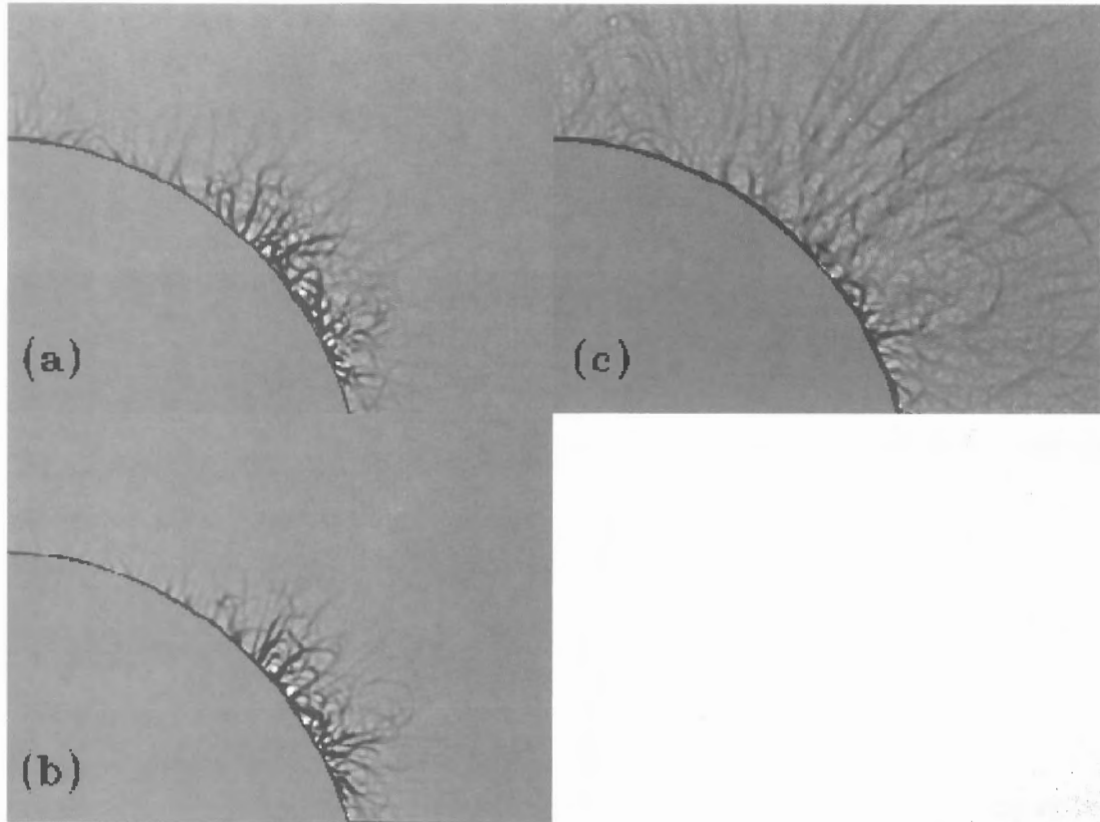


図 8.4 図 8.3 のループ構造を OMC アルゴリズムを利用して強調したもの. (a) 波長 5303.3 Å、(b) 6374.5 Å、(c) 連続光. (d) は省略.

8.7 今後の解析の方向について

8.7.1 絶対強度への換算

皆既日食の最大の利点は、低散乱光下でのコロナ輝度の精密計測である。従って、適正な方法により観測強度から絶対強度を算出することは、非常に重要な過程である。換算の方法としては、前回と同様に、各観測波長における太陽面中心の絶対強度と周縁減光曲線の文献値を既知量とし、同じ波長選択フィルタを通して観測されたコロナと光球（部分食）像の輝度を比較することにより求めることができる。

輝線の絶対強度がわかれば、輝線ループを構成するプラズマの電子密度が算出可能となる。例えば、ループの奥行きを幅と等しいとおき、ループが一様に輝線の代表する温度のプラズマからなると仮定すれば、輝線の放射効率 (emissivity) と温度、密度の関係 (文献値) を利用して密度を算出することができる。手法の詳細とメキシコ日食データの解析結果については、Takeda et al.(2000) を参照。

近年の太陽 X 線衛星「ようこう」の活躍によって、活動領域の上空に 300 万度を越える相当な量の高温プラズマが定常的に存在している可能性が指摘されている。ところがこれまでの伝統的な日食観測では、フレアなどの活発な活動がなければ、350 万度の温度成分を代表する 5694.5 Å のコロナ輝線は検出されていない。今回の CCD を用いた高精度観測によって、ごく普通の活動領域上空に 5694.5 Å の高温成分を検出できるかどうか試すのが今回の目標の一つであった。前章で述べたように、この定常高温成分の存在については今のところ否定的であるが、最終的には、5694.5 Å のフィルタ透過幅に含まれる連続光成分の絶対強度を見積もり、それを差し引いた後に有意な

成分が残らないことを示す必要がある。

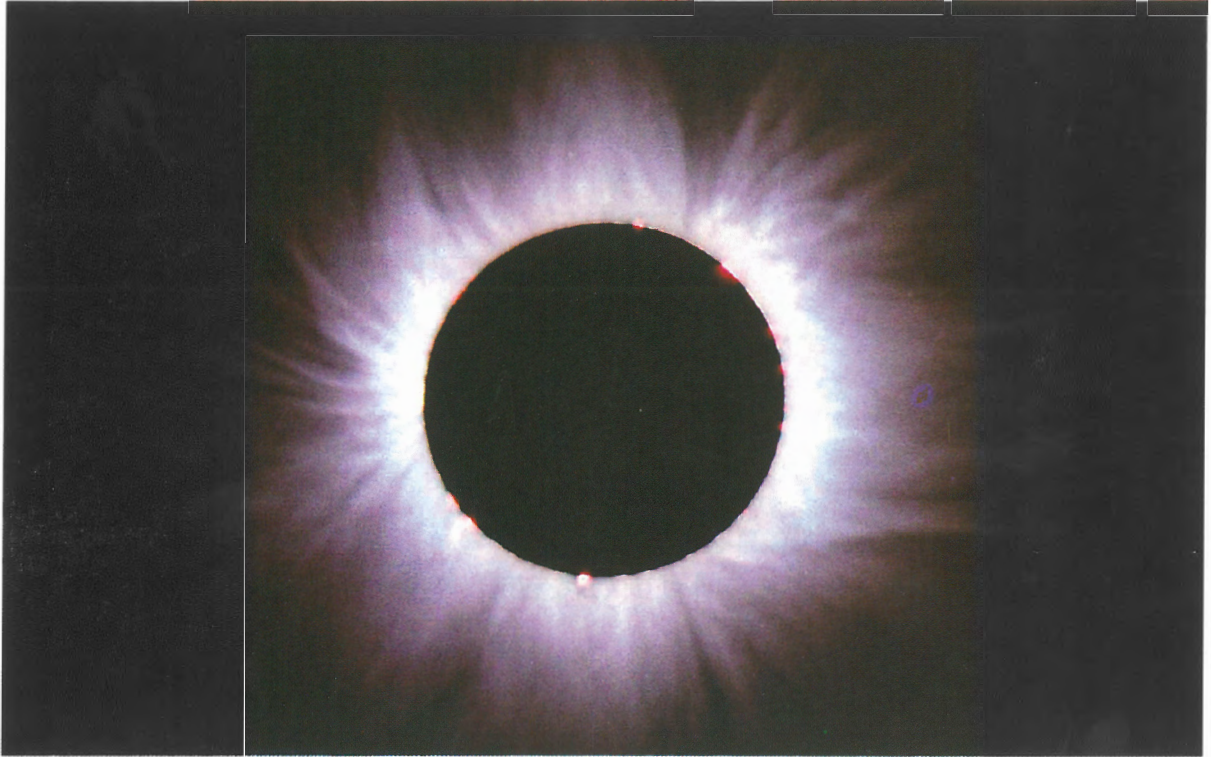


図 8.5 連続光によるコロナの全体図（明星大学観測隊がトルコにて撮影）。回転アンシャープマスキング法（Shiota, 1994）により構造が強調されている。

8.7.2 他の観測との比較

日食観測では限られた時間内に限られた資材で観測を行なうため、単一の観測班では観測対象を絞り込まざるを得ず、多様な情報を得ることができない。当然ながら、他の装置、異なる視野・波長による観測データで情報を補う必要がある。例えば、今回の我々の観測では太陽の約四半球程度が視野であるが、より広い範囲のコロナとの繋がりを見ることは重要で、コロナ全体像（図 8.5：明星大学観測隊による）の参照は不可欠である。また、皆既日食では見えない太陽面の構造とその時間発展を知ることが、視線方向に縮退した情報から観測対象の立体的な描像を得るのに重要である。例として「ようこう」衛星の軟X線望遠鏡（SXT）による日食当日のコロナ像を図 8.6 に示す。形態学的な利用以外にも、SXT データからは、温度解析を行って観測領域の温度とエミッションメジャー（EM）を得ることができる。従って、日食観測において輝線の絶対強度から導かれる 100 万度、200 万度のプラズマの総量と SXT から得られる EM を比較してみることは興味深い。

「SoHO」「TRACE」など近年の人工天体による太陽観測では、171 Å（約 100 万度）、195 Å（約 150 万度）、284 Å（約 250 万度）等の極紫外コロナ輝線による撮像が定常的に行なわれてい

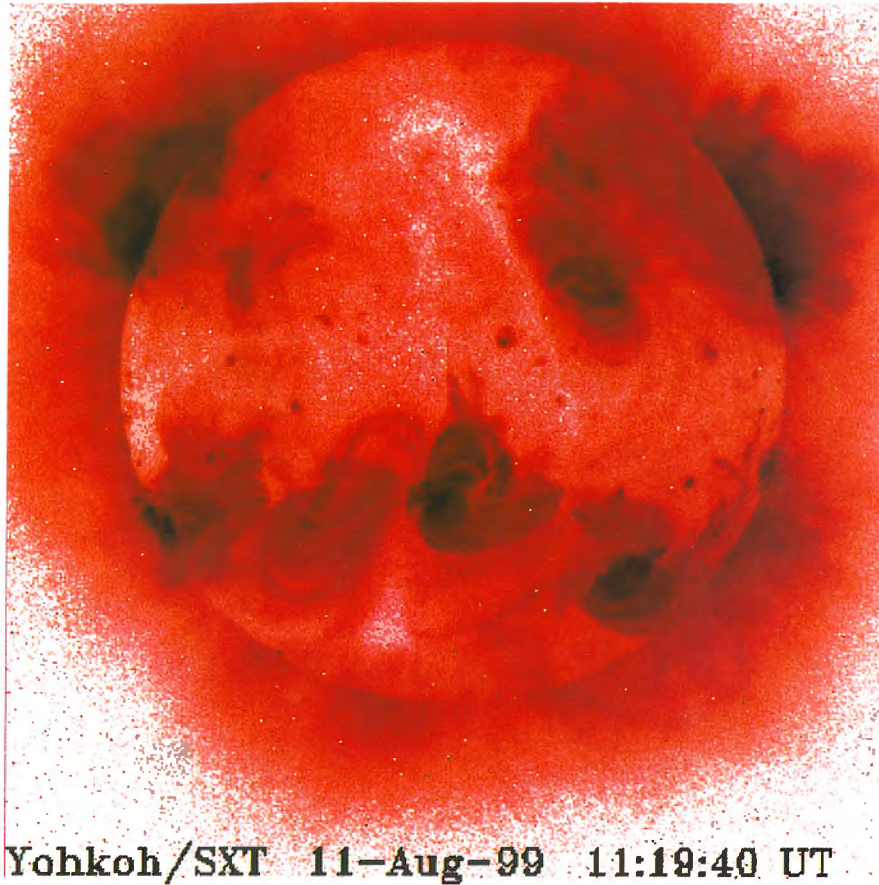


図 8.6 「ようこう」衛星による皆既日食当日の軟X線コロナ像.

る. これらの輝線が代表する温度は、可視域のコロナ輝線のものと微妙に異なるため、両者を合わせれば 100 万度から 300 万度に至るプラズマの温度分布を細かい温度刻みで推定することができるはずである. 特に、ループ構造の見え方が温度と共にどのように変化するか（または、しないか）を調べることは非常に面白いテーマだと考えている.

参考文献

- Shiota, K.: in D. di Cicco, 'Eclipse Photography Goes Digital', *Sky & Telescope*, 88 (5), 18–20, 1994
- Takeda, A., Kurokawa, H., Kitai, R., and Ishiura, K.: 'Contribution and Properties of the Green- and Red-Line Coronal Loops in the K-Corona', *Publ. Astron. Soc. Japan*, 52, 375–391, 2000

9. 国立天文台班

1999年8月11日皆既日食による太陽コロナの温度、速度場構造の研究

一本 潔、田中伸幸、篠田一也

要旨：

コロナの電子温度と太陽風速度の空間分布を求め、コロナ加熱や太陽風加速のメカニズムを解明するため、1999年8月11日の皆既日食においてコロナの低分散スペクトルの観測を行った。当日好天に恵まれ、目的とする極域コロナのスペクトルを8枚取得することに成功した。データの1次処理を終え、約200万度の高さ方向にかなり一様なコロナ温度が得られた。



図 9.1 エラジ市ハルプットの丘に設置された観測機材。

9.1 観測の目的

太陽コロナの温度構造を正確に求めることは、コロナの加熱問題や太陽風の起源を解明する上できわめて重要であり、これまで様々な方法を用いた測定が試みられてきた。しかしすべての方法には温度の導出にあたってそれぞれ特有の仮定を使っており、その結果には互いに食い違いもあった。コロナの電子温度を決定する最も確実な方法は、「温度」の定義である電子の熱運動の大

きを測ることである。そして、その情報はコロナが発する連続光スペクトルの形に見いだすことが出来る。コロナの連続光スペクトルは、コロナ中を高速に熱運動する自由電子が光球の光を散乱する際に、太陽光に含まれる吸収線構造をドップラー効果によって消してしまうことによって形成されるが、多数の吸収線が集まるところ、例えば波長4300 Å付近やCa IIのH、K線を含む3850 Åあたりには尚その痕跡が広い吸収帯として残っており、その深さを精度良く測ることでコロナ電子の熱運動の大きさを直接測ることができるからである。

さらにその吸収帯の波長方向の変移を測ることで、太陽風の速度を求めることができる。コロナの温度（さらには圧力）と速度の空間分布を同時に得ることで、未だ解明されていない太陽風の加速メカニズムに対する重要な手がかりが得られると期待できる。

国立天文台はこの効果に着目し、1994年11月3日の南米皆既日食を観測し (Ichimoto et al. 1996)、ストリーマーとコロナホールとの底部における電子温度を高い信頼度で決定することに成功した。しかしながら皆既時間約3分という限られた時間に得られたのは、分光器のスリットをコロナの3カ所にあてたものだけであり、コロナ温度や速度場の空間的な分布構造を議論するには不十分なものであった。また、生憎の薄雲のため散乱光のやや多いデータとなった。

今回の目的は、コロナのより広がった2次元的な情報を、より好条件の元に多数取得することである。また、高速太陽風の源とされる極域コロナを狙うことで、太陽風加速のプロファイルと温度構造との関係を求めることも新しい試みである。

表 9.1 観測機材諸元.

望遠鏡部：	
形式	シュミットカセグレン (セレストロン)
口径	28cm
焦点距離	1400mm (フォーカルレデューサー付)
分光器部：	
スリット	4.5度金属鏡、幅100μm (12秒角に相当)
コリメータレンズ	f250mm、ダブルット
グレーティング	透過型、600本/mm
カメラレンズ	f150mm、ダブルット
CCDカメラ	ペルチエ冷却水冷式 (-40C、ホトメトリクス社製)
ピクセル数	512 x 512
ピクセルサイズ	24 x 24 ミクロン
読み出し速度	200kHz
波長範囲	3500-4720 Å
波長分解能	2.418 Å/pix
空間分解能	12秒角 (スリット幅) x 5.51秒角/pix (スリット方向)

9.2 観測機材

国立天文台班は、8月1日から12日の間、トルコ共和国のエラジ市郊外にあるハルプット丘に観測地を構えた。観測機材は、口径28cmの反射望遠鏡、小型分光器、冷却CCDカメラ、お

よび制御コンピュータからなる。表 9.1 に機材の主たる諸元を示す。

スリット上のコロナのイメージは別の光学系でビデオ信号として取り出され記録された。1994年の南米日食で使われた機材を今回も使用したが、以下の改良が加えられている。

- 蒸着ガラススリットを金属スリットとすることで、光量の損失と迷光を低減した。
- CCD の読み出しが速くなり、皆既中のロス時間が減少した。
- 望遠鏡全体をアルミホイルで巻くことにより、日食による温度変化の影響を極力抑えることにした。

機材の設置風景を図 9.1 に示す。

9.3 取得データ

およそ 2 分の皆既時間に得られたデータは 8 つのスペクトルである (表 9.2)。

表 9.2 観測データ一覧。

	スリット高さ (太陽半径)	露出開始時刻 (UT)	露出時間 (秒)	注
0	1.11	11:36:06	2	部分的にサチリ
1	1.11	11:36:15	0.5	
2	1.47	11:36:32	5	
3	1.92	11:36:50	10	
4	2.35	11:37:19	20	
5	3.0	11:37:47	20	高さは概数
6	0.90	11:37:55	2	月を含む
7	1.76	11:38:07	5	

皆既の前後には波長校正用にスカイのスペクトルを撮影、また、皆既直後には各露出時間のダークフレームを取得した。得られたスペクトル画像を図 2 に示す。

今回の観測ターゲットの 1 つは、極域のコロナホールを狙うことであったが、時期が活動極大期に近づいていたため極の方向にもストリーマが存在していた。

9.4 データ処理および初期結果

得られたスペクトルデータに以下の処理を施した。

- 1) ダーク引き算
- 2) スカイのスペクトルを用いて波長校正
- 3) 地球大気による吸収の波長依存性を補正
- 4) スカイのスペクトルを用いて F コロナ成分を除去
- 5) コロナの輝線スペクトルを除去
- 6) 波長方向の感度むら補正
- 7) スリット方向の感度むら補正
- 8) 得られた連続スペクトルを理論計算と比較、温度の導出

図 9.3 に得られた連続スペクトルとコロナの異なる温度で理論的に予想されるスペクトルとの比較を示す。この例では最もよくフィットする温度として 2.1MK が得られている。

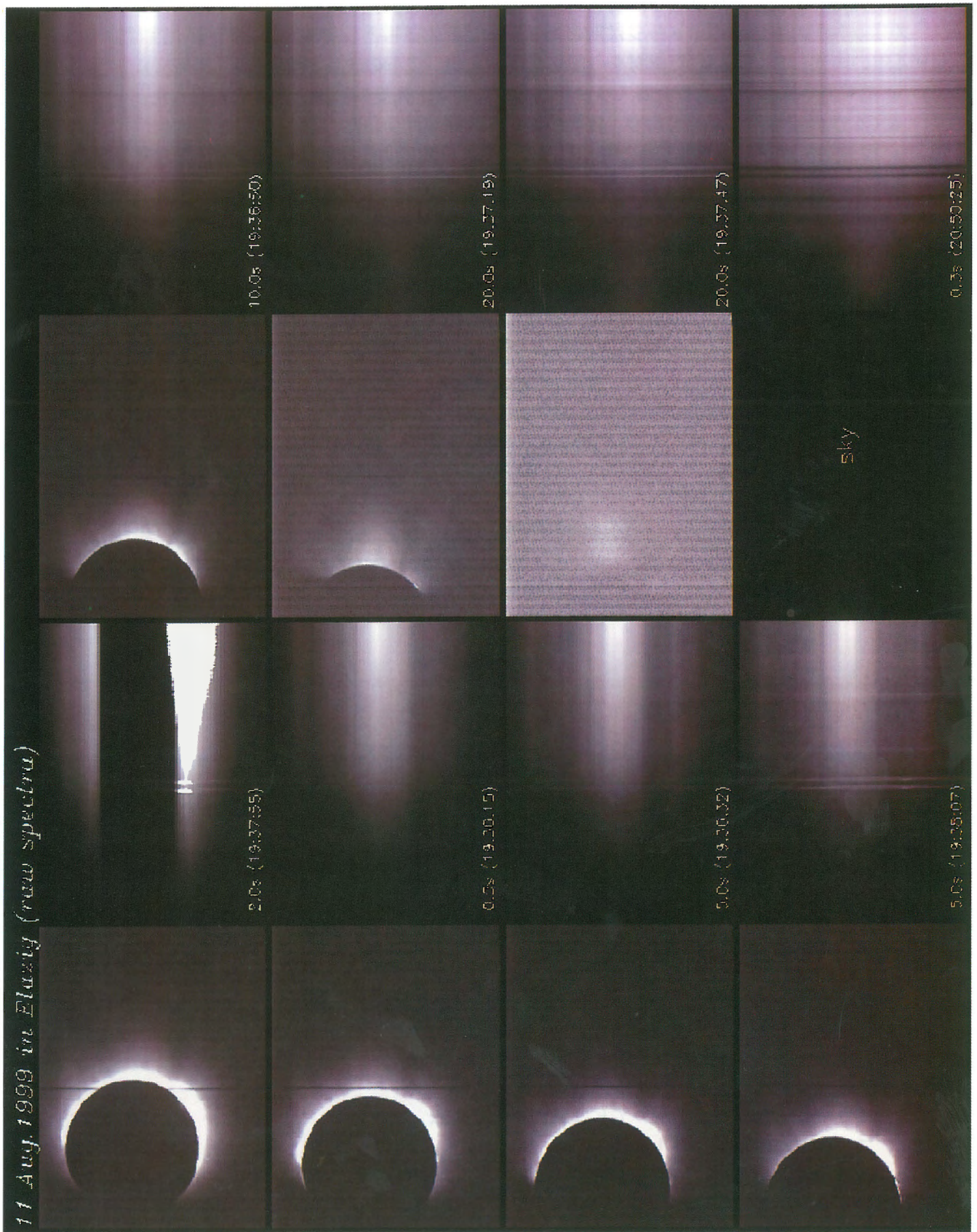


図 9.2 皆既中に得られたコロナのスペクトル.

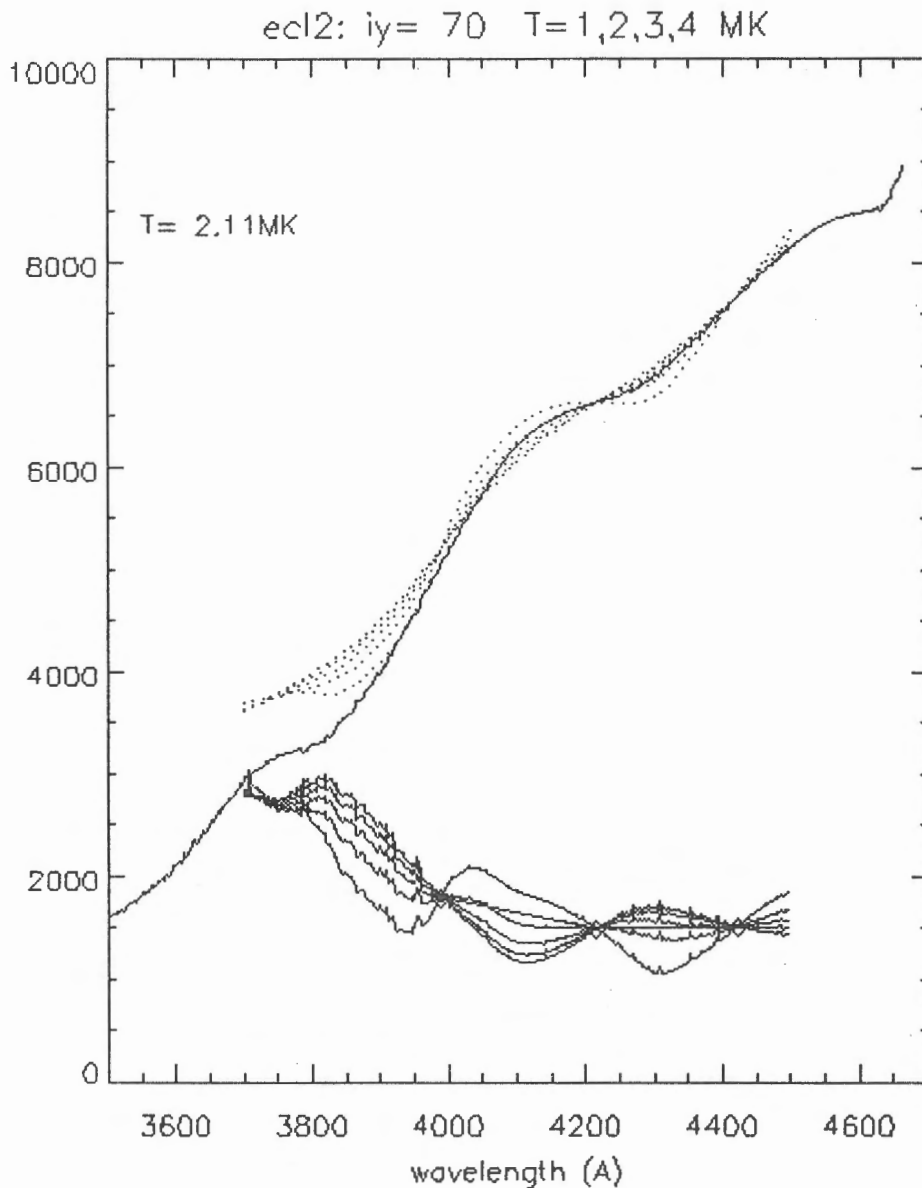


図 9.3 処理後のコロナ連続スペクトルの例. 点線はコロナ温度 1,2,3,4MK に対する理論的予想、下の実線は観測スペクトルとの差.

図 9.4に以上の解析によるスリットに沿ったコロナの温度分布を示す. 図から分かるように、今回の解析からコロナ温度として概ね 200 万度という値が得られた. また、ストリーマーではその周りよりも若干高めの温度となっているが、温度のピークは強度のピークと空間的に一致しない. 温度の高さ分布についてはストリーマの温度が 1.5Ro あたりにピークがあるように見受けられるが、それ以外の場所については今のところ有意な温度勾配は認められない.

9.5 課題

これまでの解析から以上のような結果が得られたが、図 9.3 からわかるように観測スペクトルと理論スペクトルとの間には、特に短波長側において系統的な差が見られる. この差は高いスリット位置で得られた強度の弱いスペクトルでより顕著であり、観測装置内或いはスカイで発生した散乱光が影響を与えている可能性がある. 今後より注意深く散乱光の補正方法を検討し、結果の信頼性を高める必要がある. また、速度場に関する解析も進めていく予定である.

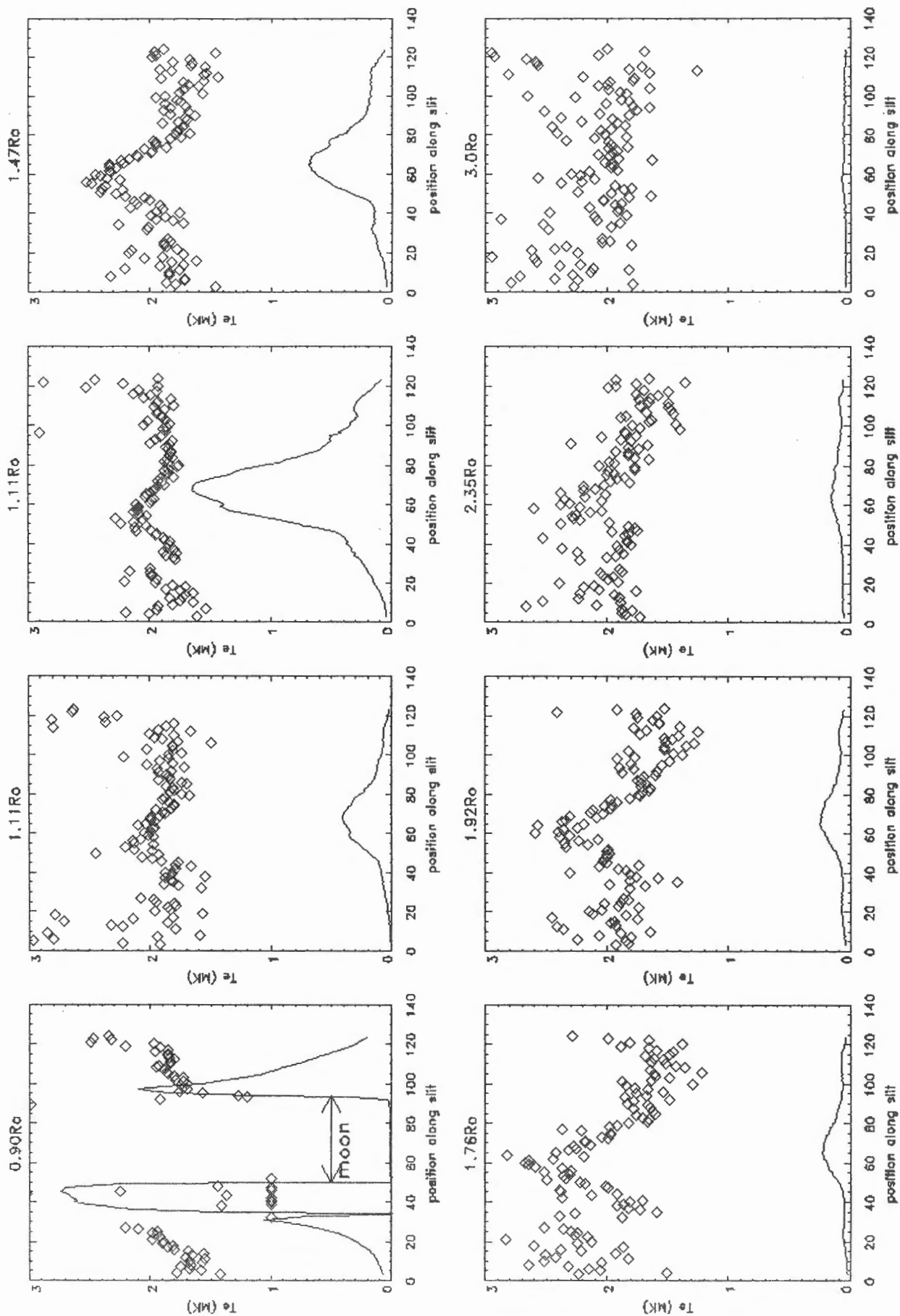


図 9.4 スリットに沿ったコロナの電子温度. 下の実践は連続光強度を示す.

参考文献

Ichimoto, K., Kumagai, K., Sano, I., Kobiki, T., Sakurai, T., and Munoz, A.: 'Measurement of Coronal Electron Temperature at the Total Eclipse on 1994 November 3', Publ. Astron. Soc. Japan, 48, 545-554, 1996

10. 九州大学班

Multi-point Magnetic Observations during the August 11, 1999 Total Solar Eclipse

Y.-M. Tanaka⁽¹⁾, K. Yumoto⁽¹⁾, H. Tachihara⁽¹⁾, M. Shinohara⁽¹⁾, J. Vero⁽²⁾, V. Wetztergom⁽²⁾,
P. R. Sutcliffe⁽³⁾, A. Meloni⁽⁴⁾, P. Palangio⁽⁴⁾, J. C. Riddick⁽⁵⁾, and S. F. Toteu⁽⁶⁾

(1) Graduate School of Sciences, Kyushu University

(2) Geodetic & Geophys. Res. Inst. of Hungarian Academy of Sciences

(3) Hermanus Magnetic Observatory, South Africa

(4) Inst. Natl. di Geofisica, Italy

(5) British Geological Survey

(6) C. R. G. M., Garoua

要旨

1999年8月11日にヨーロッパで起こった皆既日食に関して、日食の地上磁場への影響を調べる為に、地上磁場ネットワーク観測を実施した。日食皆既帯の経路に沿って3ヶ所(HAR, NCK, LAQ)、グローバル性の調査のため磁気赤道に1ヶ所(GAR)、皆既帯のほぼ磁気共役点に1ヶ所(HER)の計5ヶ所にフラックスゲート磁力計を設置した。その結果、日食時にNCK、LAQでローカルに7~10nTの磁場D成分の増加が観測された。この現象は、日食下で電離層電気伝導度が減少しSq電流が減少した為であると解釈される。このような現象はHARでは確認されなかったが、これはHARが日食時にたまたまSq電流系の渦の中心付近に位置しており電流自体が小さかった為、電流の減少が観測にかからなかったのではないかと推量される。また、皆既帯のほぼ磁気共役点に位置するHERでは、日食時に有意な磁場変動は観測されなかった。

表 10.1 観測点の座標.

Station code	Station name	Nation	Geographic		Geomagnetic		L
			lat.	lon.	lat.	lon.	
HAR	Hartland	United Kingdom	50.98	-4.48	47.77	75.19	2.25
NCK	Nagyceenk	Hungary	47.63	16.72	42.69	91.71	1.88
LAQ	Laquila	Italy	42.38	13.32	36.26	87.60	1.56
GAR	Garoua	Cameroon	9.18	13.24	-0.40	84.89	1.00
HER	Hermanus	South Africa	-34.34	19.24	-42.05	82.30	1.85
conjugate of HER			47.04	6.28	42.10	82.63	1.85

10.1 地上磁場ネットワーク観測

我々のグループでは1999年8月11日にヨーロッパで起こった皆既日食に関して、日食の地上磁場への影響を調べる為に、地上磁場ネットワーク観測を実施した。観測にはフラックスゲート磁力計が用いられ、1秒サンプリングで記録された。今回の日食磁場ネットワーク観測には、大きく2つの目的がある。第1に日食の影響が本当に日食下の観測点でローカルに観測されているのか確かめること、第2に日食の影響が磁力線を通じて反対半球の磁場変動に影響を与えるかどうか調査することである。

表 10.2 各観測点での日食の起こった時刻。

Station	First contact	Maximum of eclipse	Last contact
HAR	0835UT (0835LT)	1014UT (1014LT, 98.9%)	1133UT (1133LT)
NCK	0924UT (1024LT)	1047UT (1147LT, 100.3%)	1210UT (1310LT)
LAQ	0914UT (1014LT)	1044UT (1144LT, 85.8%)	1210UT (1310LT)
conjugate of HER	0908UT (1038LT)	1029UT (1059LT, 95.4%)	1153UT (1223LT)

LT は HAR、NCK、LAQ、HER の磁気共役点で、それぞれ UT+0hr、UT+1hr、UT+1hr、UT+0.5hr として計算している。

第1の目的の為、我々は日食皆既帯の経路に沿って、イギリスの Hartland (HAR, 食の最大 98.9%) とハンガリーの Nagycenk (NCK, 食の最大 100%)、さらに磁気経度は NCK とほぼ同じであるが皆既帯からわずかに離れたイタリアの Laquila (LAQ, 食の最大 85.8%) に磁力計を設置した。日食がローカルに地上磁場に影響を及ぼすならば、日食が観測点上空を横切っていくにつれて各々の観測点で磁場変動が異なった時間に刻々と確認されるはずである。また、観測される磁場変動が実際にローカルに起こっているのかどうか調べる為に、磁気赤道に位置するアフリカの カメルーンの Garoua (GAR) に磁力計を設置した。さらに第2の目的の為、皆既帯の磁気共役点付近に位置する南アフリカ共和国の Hermanus (HER, 磁気共役点の食の最大 95.4%) に磁力計を設置した。また、日食時の磁場変動が有意なものであるか判断する為に、全ての観測点で前後 1~2 週間の観測を行なった。図 10.1 は今回の観測で用いられた観測点の位置を、表 10.1 は観測点の座標を示している。

10.2 Sq 電流系への日食効果

図 10.2 は上から 8 月 7 日から 8 月 15 日までの NCK の磁場データの H、D 成分を示している。地磁気の擾乱具合の指標である Kp 指数によると 8 月 10 日から 14 日まで地上磁場は非常に静かで、10 日は総 Kp 指数は 9、11 日には総 Kp 指数は 12+ であった。日食は横線で示した 8 月 11 日 0924-1210UT に起こっており、日食が起こった時間の Kp 指数は 1-~1 であり、比較的静穏であった。図 10.3 は今回観測を行なった 5 つの観測点で得られた 8 月 11 日の磁場の日変化であり、横線はそれぞれの観測点で日食の起こった時間を示している。NCK1 点では分からなかったが、図 10.3 より 0800UT から 1200UT にかけて 20~30 分周期の DP2 型地磁気擾乱がグローバルに観測されている。特に磁気赤道にある GAR では H 成分の赤道エンハンスが見られており、極域からのグローバルな電場の侵入を示唆している。我々は日食下のローカルな磁場変動に注目しているので、ここではこの DP2 型地磁気擾乱には注目しない。

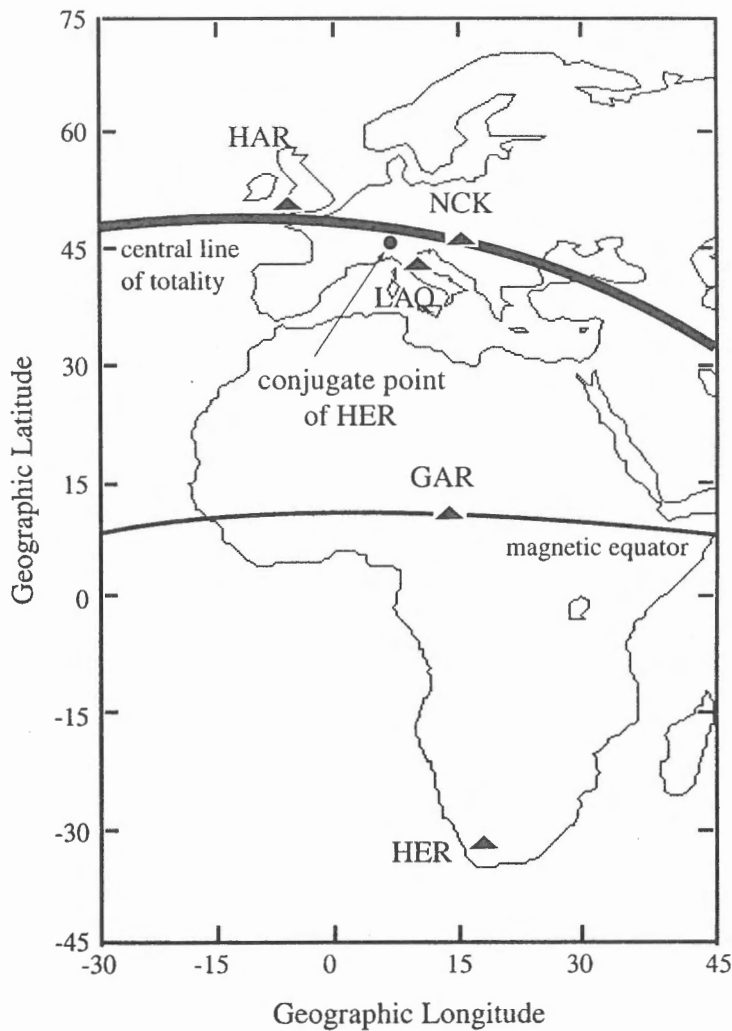


図 10.1 日食観測で用いられた観測点の位置.

8月11日は磁氣的に静かな状況であった為、 S_q 電流系は安定して観測されている。夜側では S_q 電流が非常に小さいと仮定し S_q 電流が作る夜間の磁場変動はほぼ $0nT$ であると考え、図10.3よりNCK、LAQの日食はD成分が負（北向き電流に相当）の時に起こっており、 S_q 電流系の渦の中心の西側で起こったと考えられる。同様に、HARの日食は経度的に S_q 電流系の渦のほぼ中心付近で起こっていたことが分かる。表10.2は、各観測点での日食の起こった時間を示しており、LTはHAR、NCK、LAQ、HERの磁気共役点でそれぞれUT+0hr、UT+1hr、UT+1hr、UT+0.5hrとしてある。これによると、HARではほぼ1015LTに、NCK、LAQでは1145LTに日食が最大になっている。参考の為、図10.4に環太平洋地磁気観測網 (Circum-pan Pacific Magnetometer Network, CPMN) [Yumoto et al., 1996] によって得られた1997年8月6日の S_q 電流系を、8月の静穏日の S_q 電流系の例として示す。これを見ると、北半球で渦は午前側に片寄っており、渦の中心は1000LT付近に位置していて、HARの食の最大の時間と一致する。

図10.3を注意深く見ると、この磁場の日変化に関して日食時にNCK、LAQのD成分が増加（北向き電流が減少）している。図10.5は日食時の磁場変動の拡大図である。静穏日の磁場の日変化からの変化分を取り出す為、観測期間中最も静かであった8月10日（総 K_p 指数=9）0700-1400UTの磁場変動を多項式でフィッティングしたものを差し引いてある。これを見ると、やはり日食時にNCK、LAQの磁場のD成分が7~10nT増加し皆既日食を境にして減少している。この特異な磁

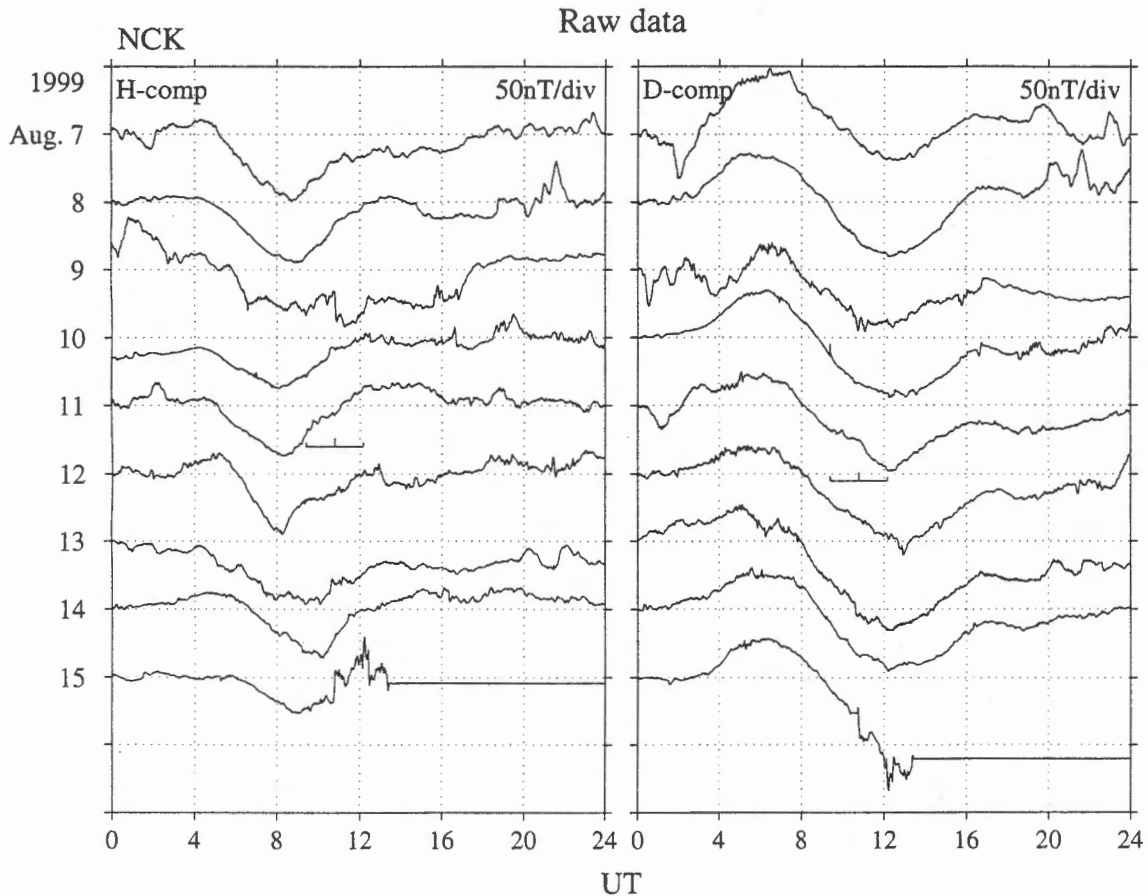


図 10.2 8月7～15日にNCKで観測された地上磁場の南北(H)、東西(D)成分. 日食は横線で示した8月11日0924-1210UTに起こった.

場変動は他の観測点では確認できなかった. GARのD成分にも磁場変動が見られたが, 振幅が小さく有意な変動であるとは言えない. しかし, このGARの磁場変動がNCK, LAQの磁場変動と無関係であると断定することは難しい. さらにH, Z成分にはこの日食に伴うような磁場変動はD成分ほどははっきりとは現れなかった.

日食時に見られたD成分の磁場変動がサブストームに関連した現象かどうかを, AE指数と日食時に夕方付近に位置していたGuam(GUA, 磁気緯度 5.63° , 磁気経度 215.55°)の磁場データを使って調べた. その結果, AE指数は日食時に非常に小さくサブストームの影響はほとんどなかったと言える. また, GUAでは1110UTにPi 2が観測されており(図10.5でも確認できる)小さなサブストームが起こっている可能性があるが, 日食中のそれ以外の時間にはサブストームに伴うような磁場変動は全く確認されなかった. それ故, やはりNCK, LAQで起こっているD成分の磁場変動はサブストームに関係しないローカルな現象である可能性が高い.

また, 日食中にPc 3-4が観測されたが, 振幅が小さく偏波の変化などはっきりとした変化は確認されなかった.

10.3 考察

日食の地上磁場への影響は1900年初めから既に報告されている. Y. Kato [1960]は磁気赤道付近で日食中に磁場のH成分が10nT程度減少(赤道ジェット電流が減少)したことを報告した. これは日食によって一時的に電離層の電子密度, そして電気伝導度が下がったため電離層電流が

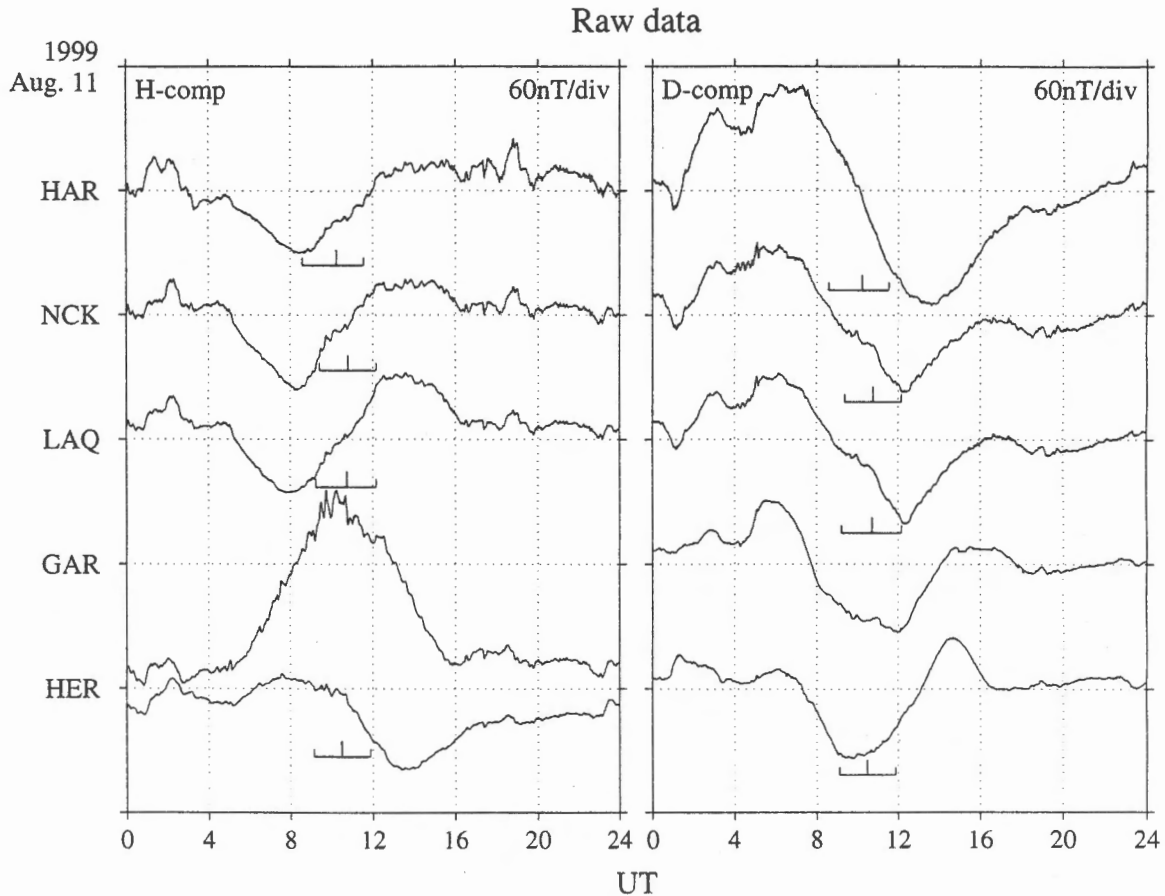


図 10.3 8月11日に観測された各観測点でのH、D成分の磁場変動。横線は各観測点（HERは磁気共役点）で日食が起こった時間を表している。

減少したと考察された。しかし、これはあくまで一ヶ所の観測点で観測された例なので、実際に日食下のローカルな現象なのか、それともグローバルに起こった現象なのかは確認できなかった。我々はNCK、LAQで日食時に S_q 電流の南北成分が減少すること（磁場のD成分の増加すること）を発見した。この電流の減少はやはり日食に伴う電離層電気伝導度の減少によって理解でき、他の観測点で有意な変動が観測されていないことから、日食下でのローカルな現象である可能性が高い。しかし、この現象は同じく皆既日食の経路に位置していたHARでは確認されなかった。これは、HARが日食時にたまたま S_q 電流系の渦の中心付近に位置しており電流自体が小さかった為、電流の減少が観測にかからなかったのではないかと推量される。

さらに我々の観測では、新たに日食の磁気共役点への影響が調査された。日食は北半球で電離層電気伝導度の空間的な分布を変化させ日食下で電離層電流を妨げるので、それによって電離層中の静電ポテンシャル分布が変化する。従来の考え方では磁力線沿いには等ポテンシャルと考えられるので、北半球の静電ポテンシャルの分布の変化は沿磁力線電流によって南半球に伝わり南半球の電離層電流の分布に変化を与える可能性がある。言い換えると、北半球で日食によって妨げられた電離層電流が磁力線に沿って南半球に流れ南半球の電離層で閉じさらに北半球へ磁力線沿いに帰っていくという電流ループが作られる、ということになる。このことによって、実際には日食の起こっていない南半球でも磁場変動が観測される可能性がある。このことは、Takeda and Araki [1984]のシュミレーションによって、磁気緯度 10° という今回の日食よりもかなり低緯度であるが確認されている。

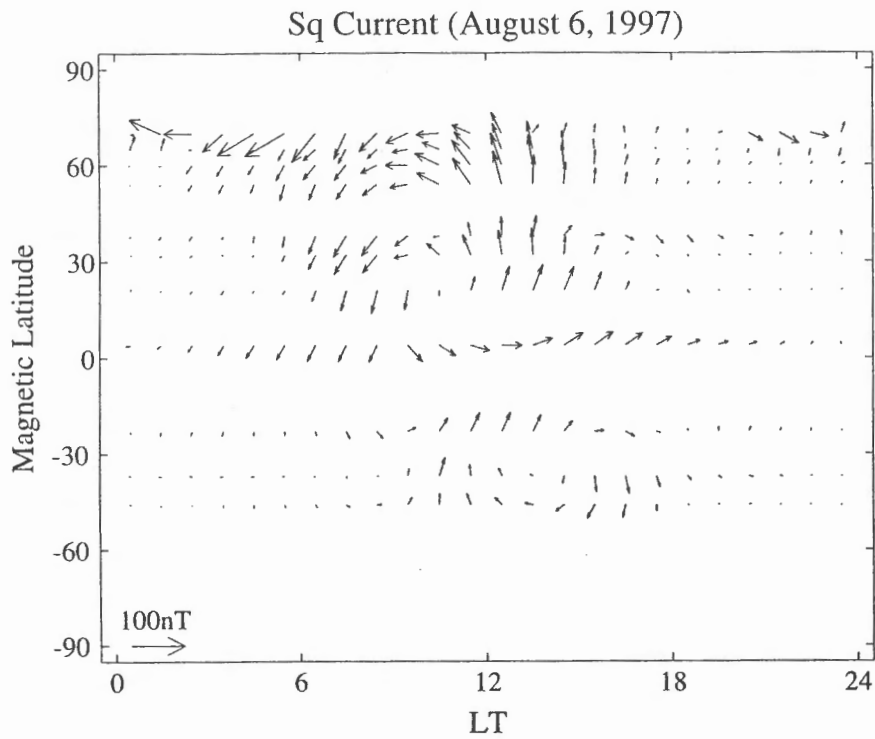


図 10.4 8月に観測される Sq 電流系の例. 図は 1997 年 8 月 6 日に観測された Sq 電流系を示す.

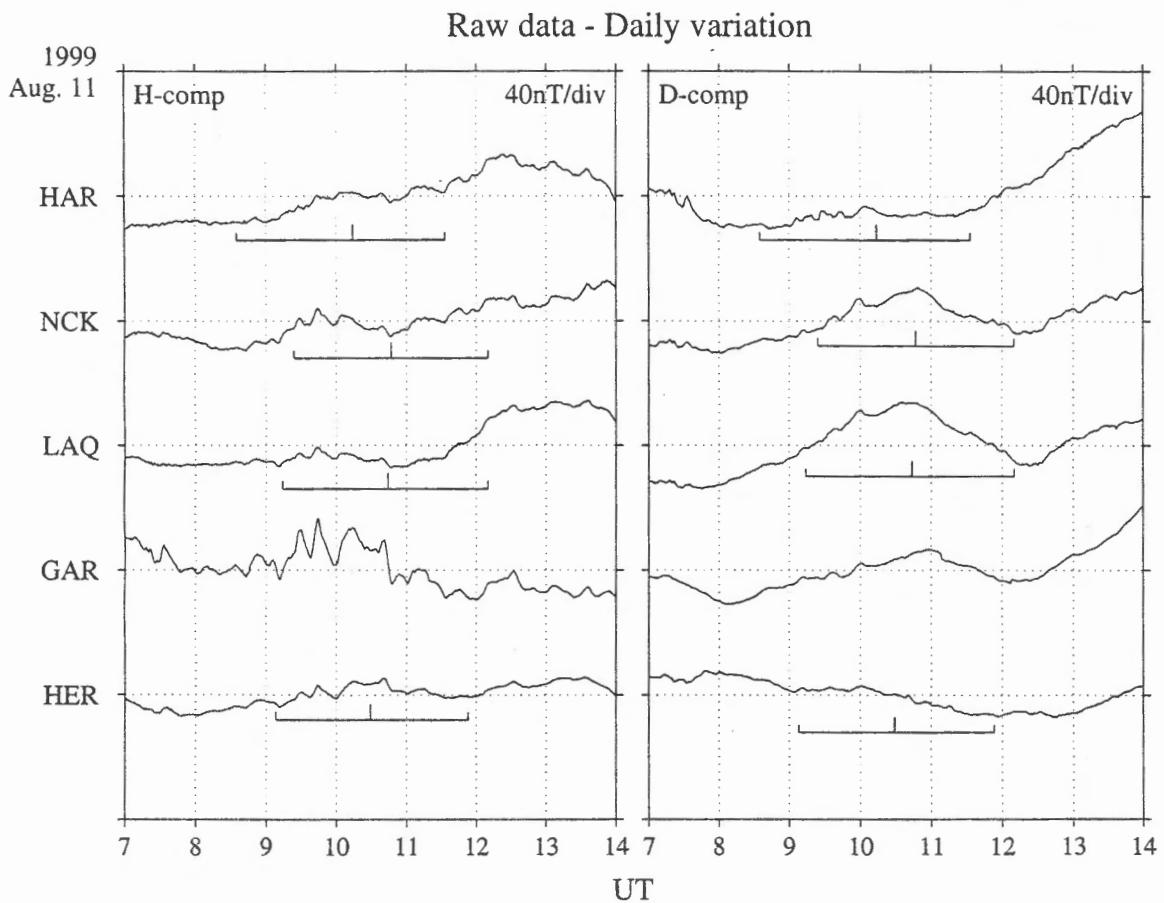


図 10.5 日食中の磁場変動の拡大図. 静穏日の磁場変動からの変化分を取り出す為、観測期間中最も静かな 8 月 10 日 (総 Kp 指数=9) の 0700-1400UT の磁場変動を多項式でフィッティングしたものを差し引いてある.

我々は皆既帯のほぼ磁気共役点に位置する HER で磁場観測を行なったが、北半球の NCK、LAQ で見られたような磁場変動は観測されなかった。しかし、HER の磁気共役点は経度的に HAR と LAQ のほぼ中間で、食の最大は 1059LT に起こっており、HAR の場合と同様に北半球の Sq 電流系の渦の中心付近にあった可能性も考えられる。それ故、日食時に HER の磁気共役点での Sq 電流自体が弱かった為、南半球に影響を及ぼすには至らなかったかもしれない。または、実際に日食は反対半球にほとんど影響を与えないという可能性も残されている。従来の計算では日食の影響は定常状態のモデルが使われたが、実際には日食の時間スケールでは定常ではない。その為、現在、誘導状態を考慮したモデルが求められている。

参考文献

- Kato, Y.: 'The Effect on Geomagnetic Field of the Solar Eclipse of October 12, 1958', Sci. Rep. Tohoku Univ. Ser. 5, 1, 21
- Takeda, M. and T. Araki: 'Ionospheric Current and Fields during the Solar Eclipse', Planet. Space Sci., 32, 1013, 1984
- Yumoto, K., and The 210° MM Magnetic Observation Group: 'The STEP 210° Magnetic Meridian Network Project', J. Geomag. Geoelectr., 48, 1297, 1996