

が可能で、正確な大気構造を求めることができる。

(2) 大型装置による高空間分解能観測可能

皆既日食外でも、特殊な観測装置を用いれば、彩層や、コロナも観測可能である。例えば、非常に狭い透過幅をもつ複屈折フィルターでの彩層観測、高山に置かれたコロナグラフによるコロナ観測がある。しかし、これらの装置は、大型のものをつくるのが、難しい。しかし、皆既日食時には、このような装置を使う必要がなく、大型の、明るい光学系をもった通常の装置での観測が可能である。地球大気擾乱による像劣化の問題点はあるものの、可視・赤外域での高分解能コロナ観測という点では、スペース観測はコスト的に達成がむつかしく、地上観測の大きな魅力である(表1参照)。近年、赤外域での高感度2次元センサーが、安価に手にはいるようになってきており、地球大気擾乱の影響が少なく、波長分解能の点でも利点のある赤外域での大型望遠鏡による高分解能コロナ観測が可能になるであろう。

(3) 太陽月の相対運動を利用した高空間分解能観測

太陽・月の天球上での相対速度は高精度で求めることができ(約0.3"/秒)、月の掩蔽による、明るさの詳細変化から、通常観測では達成不可能な構造の微細空間スケールを求めることができる。

1.4.3 今後の皆既日食観測

皆既日食観測の歴史は古く、可視域でのありとあらゆる観測がやり尽くされているといっても過言ではない。従って、今後の可視域可視域観測では、いかにデータの精度を上げるか、新しいデータ解析手法を編み出すかという点に絞られる。しかし上に述べた日食観測の利点はスペース観測の時代でも失われてなく、且つ赤外域は、観測が始まったばかりで、この波長域で威力を発揮する以下のような魅力的な研究が期待できる。

(1) 彩層低温領域の観測：

最近、4-5ミクロン近傍のCO分子線などの観測により、温度4000度台の大気が存在していることが確認された。これは彩層加熱と関連して非常に興味ある観測で、日食を利用して、太陽縁での詳細観測により、高さ方向の大気構造の非一様性を調べる必要がある。

(2) コロナの磁場観測：

コロナ輝線は線幅が広いため可視域ではゼーマン効果による磁場測定が難しいが、赤外域ではこれが可能になってくる。最近S IX $\lambda 1.25\mu$ 、Si X $\lambda 1.43\mu$ といったコロナ輝線が赤外観測により確認され、偏光観測による磁場測定が期待される。

また、これらの観測はスペース観測と相補的な役割を果たすと考えられる。この実現のために、移動可能な大型(口径1mクラス)の観測装置の開発が望ましく、今後とも、観測場所の提供だけでなく、国際協力、また、分野間協力をますます重視する必要がある。

(国立天文台・太陽物理学研究系・末松 芳法)

2 惑星間空間物理学：惑星間塵、太陽の輪の観測

2.1 はじめに

惑星間塵の存在は黄道光の観測で明らかである。その反射スペクトルの観測から数十マイクロンの粒子が主に太陽光を反射していることが示された。さらに、人工衛星や惑星間探査機による*in-situ*の観測により、粒子の質量分布関数が明らかにされてきた(図7)。

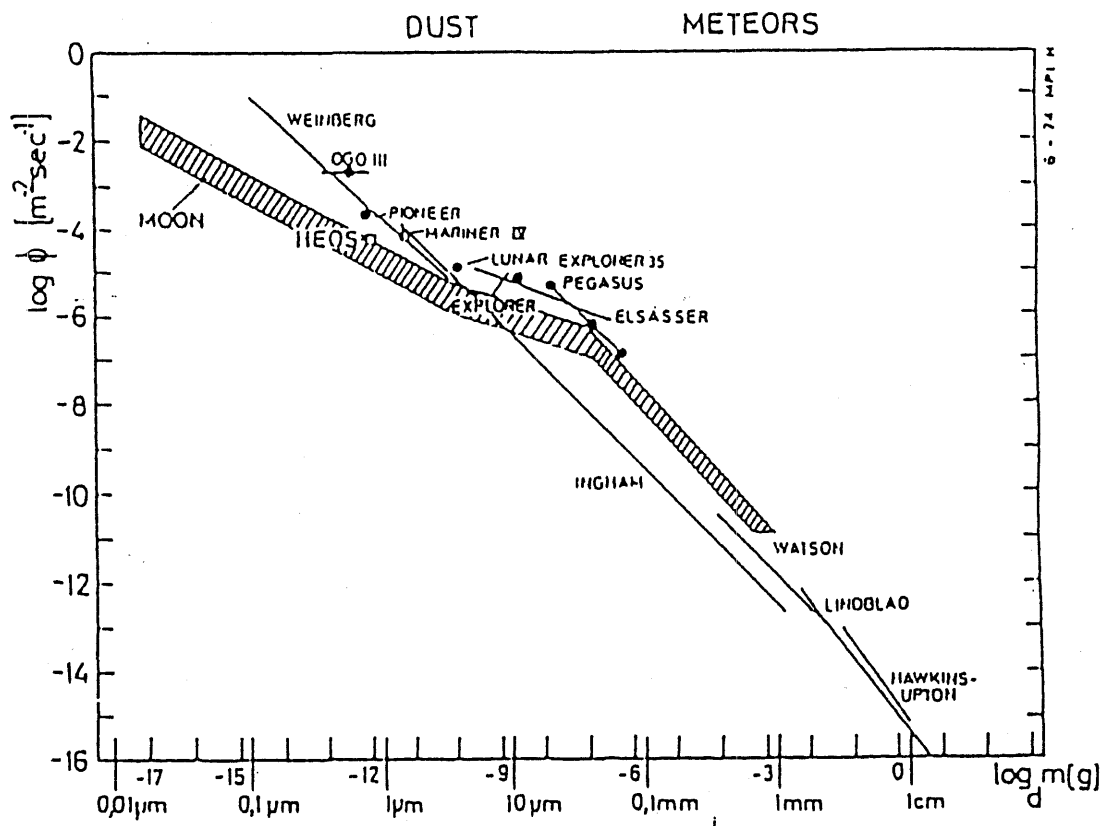


図 7: 惑星間塵のサイズ分布。それぞれのサイズの観測・測定データを重ねあわせて示してある。

太陽系内の天体の各元素の存在割合を考慮して、惑星間塵の候補物質は、氷 (H_2O)、ドライアイス (CO_2)、アンモニア (NH_3)、砂粒 (Si)、グラファイト (C)、鉄 (Fe) などが挙げられる。これらの前三者は地球軌道より内側では昇華が速いのでほとんど残っていない。しかし、物質のどれが主成分であるかは明らかではない。それらの同定には、粒子の昇華という性質のちがいを 使う観測が重要である。

2.2 粒子のふるまい

太陽のまわりをまわる粒子は、太陽の放射を受けている。これにより、ポインティング・ロバートソン効果という作用が働き、惑星間塵は徐々に太陽の方向に螺旋状に落下していく。この効果は太陽に近い方が、又、粒子サイズが小さい方が有効に働くので、それぞれのケースの落下時間は表 1 に示されたようになる。

太陽に近づいた粒子の温度は上昇し、表面から原子が放出されて半径が小さくなる。サイズが 1 マイクロンを切るようになるとポインティング・ロバートソン効果と放射圧による外向きの力がバランスするようになり、リング状に惑星間塵が多量に残る。これが太陽の塵の輪である。

2.3 太陽の塵の輪の観測

太陽の塵の輪は太陽半径の 4 倍位の所に存在しているらしい。この近辺では昼間の地球大気による太陽光の散乱によって、皆既日食の時にでもほんのわずかしかなコロナ光の輝きが勝っていない。高山や気球高度における観測が何度も行なわれてきた。そして、ある時には太陽の輪の存在が

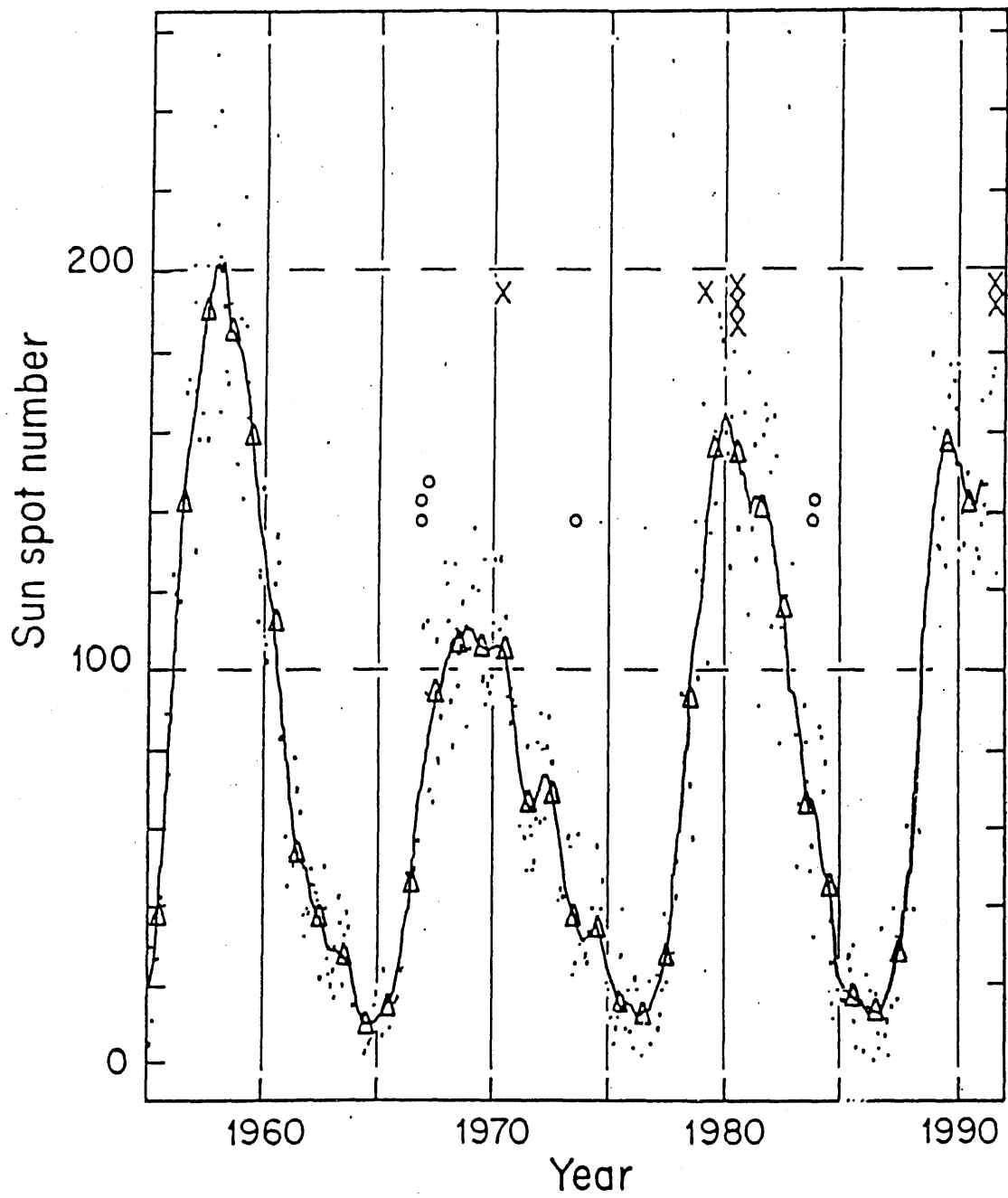


図 8: 太陽の塵の輪が検出された観測 (○印) とされなかった観測 (×印) の観測年を黒点変化の曲線 (・印は冬観測値、△は 0.2 年平均値) 図上に示してある。

表 2: 太陽からそれぞれの距離にある各サイズの粒子がポインティング・ロバートソン効果によって太陽まで落下する年数

粒子サイズ (ミクロン)	太陽からの距離 (太陽半径)			
	20.0	100	200	400
0.1	7.9	198	791	3160
0.5	10.6	264	1050	4220
1.0	15.8	396	1580	6330
5.0	79.1	1980	7910	31600
10.0	158.0	3960	15800	63300
30.0	475.0	11900	47500	190000

確認され、他の時には確認されなかった。その関係を示したのが図 8 である。その周期が太陽活動の 11 年に相当するらしい。この事を確認し、塵の輪の生成・消失のメカニズムを解明するためには、今後の継続的な皆既日食時の観測が必要である。

(国立天文台・光学赤外線天文学研究系・磯部 琇三)

3 地球物理学：地球磁気圏、超高層大気の物理

3.1 外部コロナの太陽周期変化とその地球磁気圏への影響

太陽は我々の住む地球のあらゆるエネルギーの源泉である点で、地球物理学的にも太陽の研究は極めて重要である。特に地球磁気圏擾乱の研究者にとって、地球に吹き付ける太陽風の吹き出し機構に関わるコロナの形態変化は、根元的な課題である。形態の 11 年変化については、単に観測的・形態学的に、赤道型（極小期）、丸型（極大期）、複雑型（中間期）と、大雑把に分類されてきた。しかし、理論的になぜその様な変化をするのか？ 例外が多い事実、特に活動領域に関わらない多くの複雑なストリーマーの解釈、上記と異なる変化則を持つコロナ成分や変化をしないコロナ成分との関係、それぞれの地球に対する影響など、未知の問題が山積していた。

そこでこの日食委員会関連の観測を含めて、これまでに皆既日食時に撮影された沢山のコロナ資料を調べ、他方で地球磁気圏擾乱が太陽風の磁場に関わることに着目して、太陽光球面から太陽圏に至る磁場構造と変化を調べ、両者を比較した。その結果、光球面から外部コロナ領域に移行するにつれて、複雑磁場が急速に単純化し、殆ど双極子成分（と、せいぜい四重極子成分）だけが卓越するような磁場分布になること、その分布は中性面で代表させると理解が容易であること、特に外部コロナでは、中性面に沿って明るいコロナが分布していることなどが解った。

図 9 は光球面磁場の観測データから計算された、太陽風吹き出し口付近の磁気中性曲面の太陽周期変化を示す。常に（ほぼ）一枚の磁気中性曲面は、22 年を一周期として緯度方向に回転反転していることが解る。この曲面は同時に約 27 日を一周期として経度方向に太陽と共回転することを計算に入れると、外部コロナの形態変化は次の様に良く説明できる。 先ず、極小期の外部コロナが常に赤道型として観測されることは、図に示す様に、赤道沿いに広がった中性曲面に沿って明るいコロナが分布することから、直ちに理解できる。また例えば、1983 年 6 月 11 日（中間

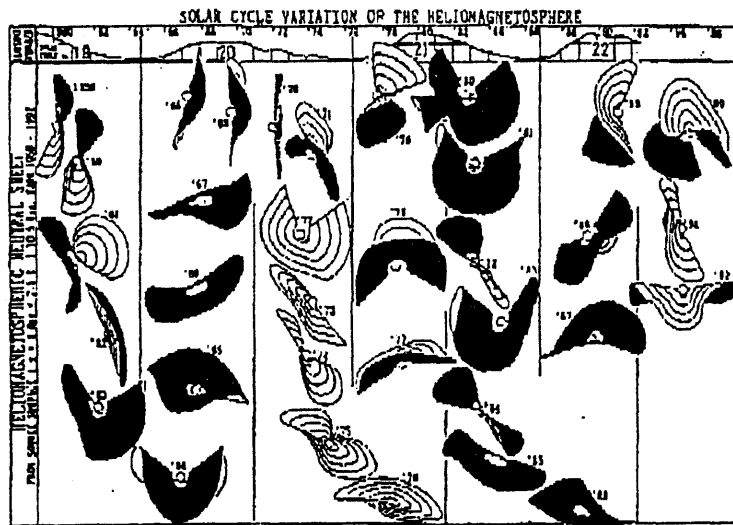


図 9: 太陽風吹き出し口付近の磁気中性曲面の太陽周期変化

期) のインドネシア日食における複雑な外部コロナのストリーマーは、鞍型をしたコロナ曲面が天球に投影された時の、重畳効果として良く説明できる (図 10 左)。コロナ曲面は極大期には垂直に立つが、コロナ面が視線方向に平行する瞬間に起こる稀な日食を除いては、丸型コロナとして観測されることが理解される (図 10 右: 1970 年 5 月 7 日の日食の例)。また、ほぼ平行した時に偶然起こった 1991 年 7 月 11 日 (極大期後半) のハワイ・メキシコ日食の際の南北に近い複数個のストリーマーは、反転し終えたばかりの中性曲面の重畳作用として良く説明できる (図 11)。しかもこの場合でも、長時間撮影をすると、コロナルホールに相当する磁気極冠域のポーラブリュームを含む淡い外部コロナも感光して、丸型コロナとして観測される (図 12 左) ことが良く説明できる。そしてそれぞれの事例において、コロナルホールから吹き出た高速太陽風や、地球の中性面通過に伴う太陽風磁場変化が、図 9 と対照することによって調和的に説明できる様になった。

以上の様な観測的な回転反転モデルは、理論的には図 12 右図の様な三双極子モデルで説明できる。光球面には黒点に対応する複雑・多数の双極子磁場があるが、外部コロナ領域磁場として生き残れる光球面双極子は、殆ど 2 個程度に過ぎない。これにポロイダル磁場を代表する中心双極子を加えた合計 3 個の双極子の磁場を合成すると、図 12 右図に示す様に、回転反転の事実が極めて良く説明できる。しかも光球面双極子は単なる理論的仮定の産物でなく、その実在が、ようこうによる観測データでも明瞭に確認されている (図 13 左)。その上、この光球面双極子領域は三太陽周期にわたって、コロナルホールや磁気中性線に対して極めて相似性の高い場所に出現した事実が判明した (図 13 右)。即ち、回帰性磁気圏擾乱を誘発するコロナルホールの位置は、この双極子領域の発生位置に従うことが解る。また、この双極子領域はフレアーが多発する場所でもあるので、この領域自体が突発性磁気圏擾乱の発生源にもなっている。

この様な外部コロナに対して、内部コロナは違った太陽周期変化をするが、これは前述の通り、外部コロナの単純な磁気中性面が、内部コロナ領域の複雑な中性面に繋がっていることに対応している。また、黄道光に繋がる最外部コロナは、殆ど太陽周期変化をせず、非プラズマであるために、地球磁気圏に直接的な電磁気学的効果を及ぼさない。この様にコロナと一言で総括さ

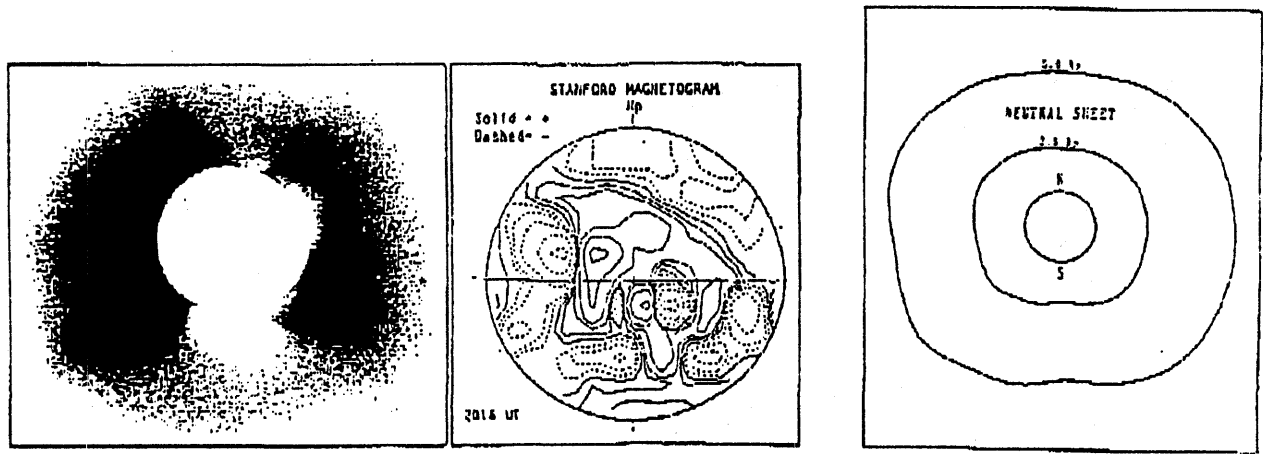


図 10: 1983 年 6 月 11 日 (中間期) のインドネシア日食 (左図)、1970 年 5 月 7 日の日食の例 (右図)。

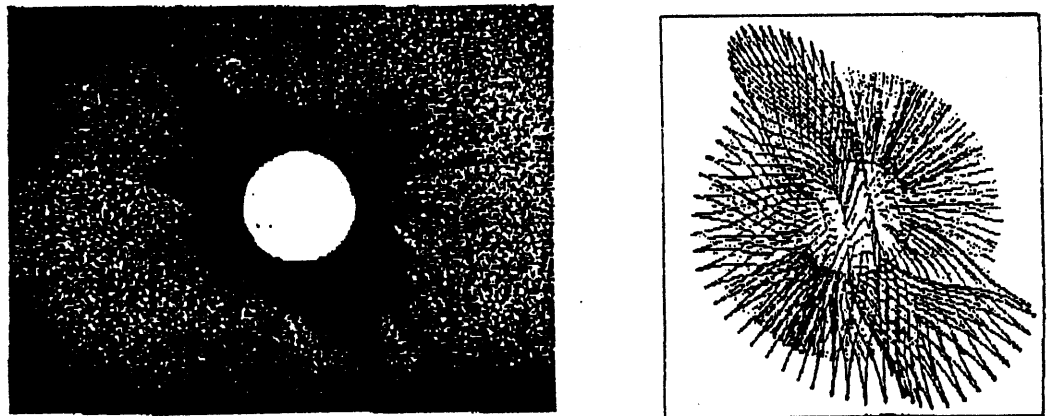


図 11: 1991 年 7 月 11 日 (極大期後半) のハワイ・メキシコ日食 (左図) と中性曲面の重畳作用 (右図)

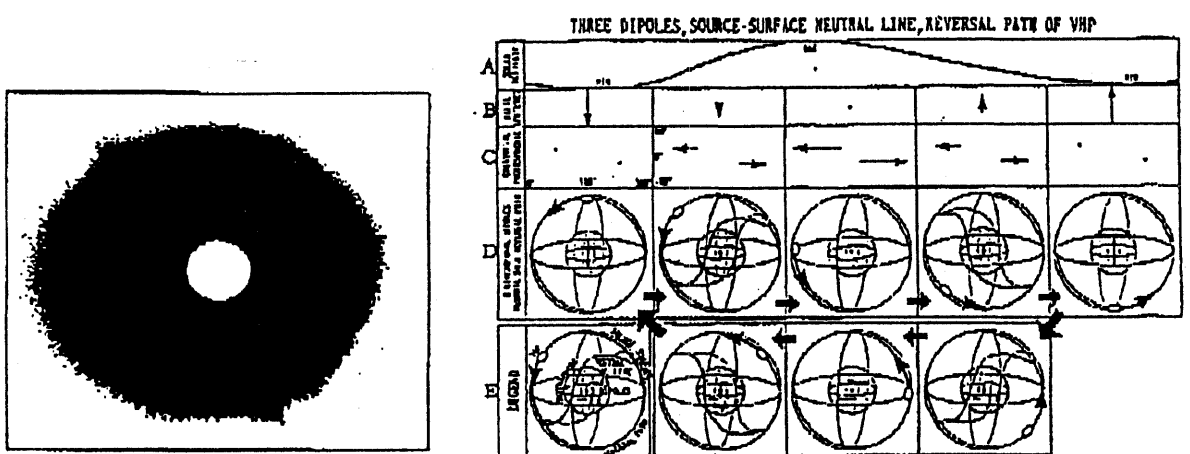


図 12: コロナの長時間撮影 (左図)、三双極子モデルの説明

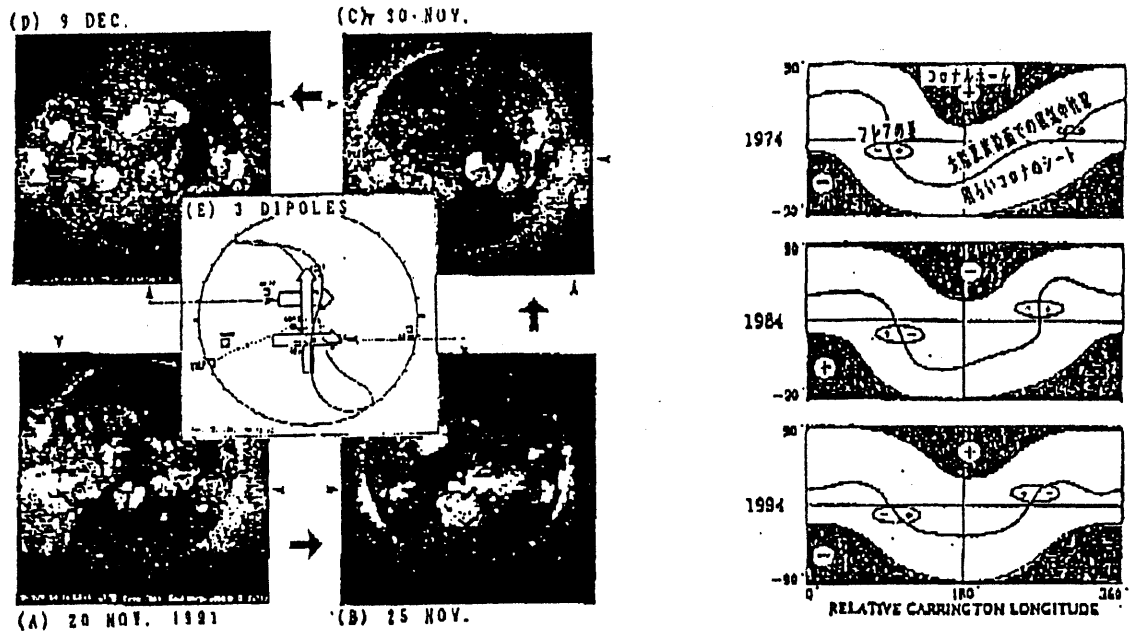


図 13: ようこう衛星による軟 X 線像 (左図) と太陽面でのコロナホール及び磁気中性線 (右図)

れているが、それを地球に効果を及ぼす成分と及ぼさない成分に分離することによって、コロナの形態変化と地球磁気圏の電磁気学的現象との関係を知ることができた。

(東北工業大学・通信工学科・瀬戸 正弘)

3.2 超高層物理学分野における日食観測

3.2.1 今までの成果

我が国の日食観測で太陽地球科学の超高層物理学分野において世界的にも大きな成果として上げられるひとは、1958年10月12日に南太平洋の Suvar row 島 (13.24°S , 163.10°W) で起こった皆既日食時に、東北大学の加藤愛雄教授グループが日食効果として最大 12nT 程度の微小地磁気変化 (図 14) を世界で初めて観測したことである。この発見により、日食効果による電離層 E 層の電気伝導度の減少が 58% にも及んでいる事が判明した。太陽光により電離した層、いわゆる電離層に日食による陰が生じたとき、電離度の減少がいままで流れていた電離層中の電流に変化を与え、地上で磁場変化として観測される事が 20 世紀当初から予測され、多くの研究者が皆既日食中の地磁気変化の発見に奔走していた。しかし、日食効果による地磁気変化の発見が第 2 次大戦後まで遅れた理由は、それまでの観測機器の磁気感度が十分に足りなかった事や観測しても地磁気活動が激しい日と重なり検出できなかったところにあった。

その後、我が国では過去 10 回の皆既日食中の地磁気観測を重ね、皆既日食中の電離層電流の形状変化、電気伝導度の変化、変化の時定数など電離層パラメータについての研究がおもになされて来たが、最近の研究課題と意義については次の節にまとめる。

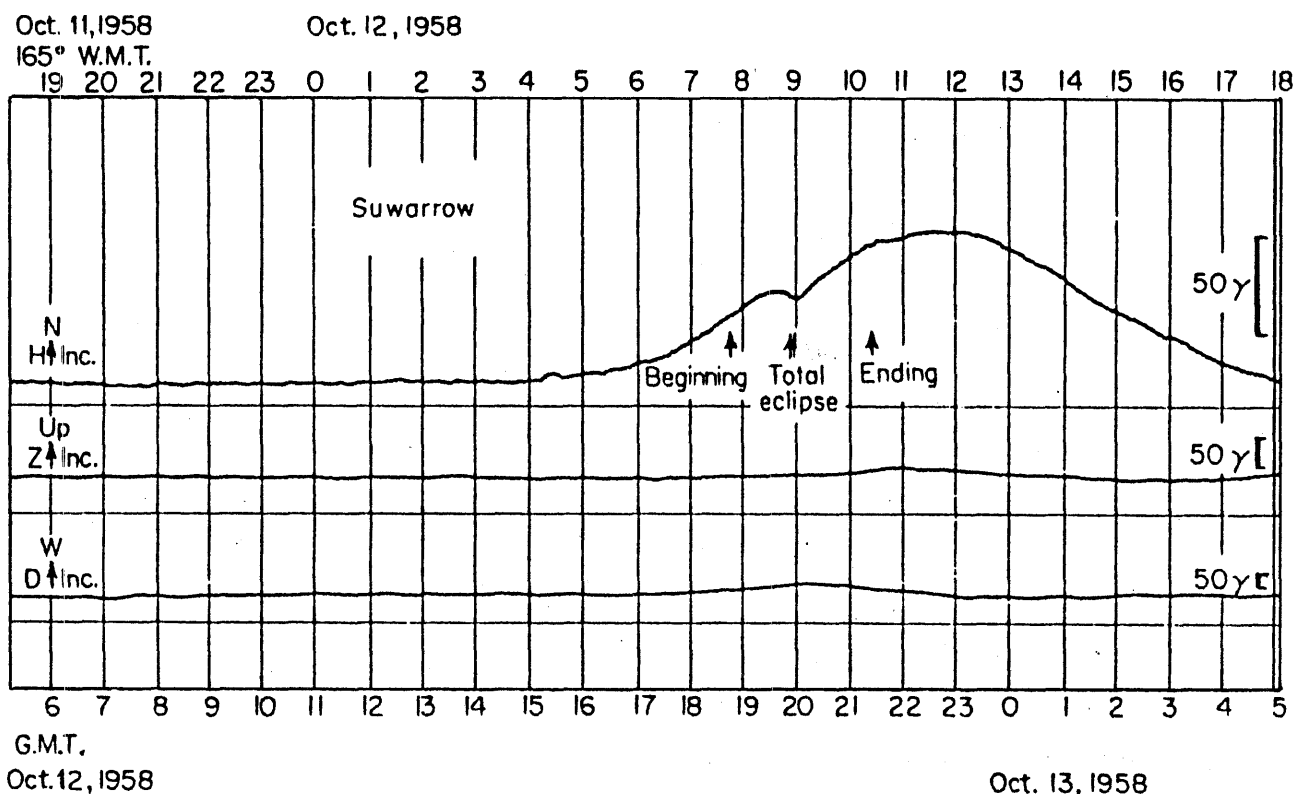


図 14: The magnetogram obtained by Y. Kato [1960] at Suwarrow Island on October 12, 1958.

3.2.2 日食の現代的意義

超高層物理学における日食の現代的意義は、日食そのものの観測研究でなく、むしろ日食効果による環境変化から、その周辺場の形成メカニズムなどの物理学の究明に焦点が絞られている。今日の日食観測では、最新のハイ・テクノロジーを用いた新しい以下のような研究課題が注目されている。

(1) 地磁気脈動観測：

最近の観測機器の性能の向上にともない、観測対象が地磁気脈動の日食効果観測に移行しつつある。地磁気脈動とは、地磁気の短周期 ($T=0.2\sim 1000$ 秒)、微小 (低緯度での振幅 1nT 以下) 変動のことである。太陽風と地球磁気圏との相互作用で励起された電磁流体波が、磁気圏内を複雑に伝播したのち、電離層で電流を誘導し、地上で地磁気脈動として観測されている。特に、皆既日食時に陰とそうでない地域でネット観測される周期 $10\sim 45$ 秒の脈動の波動特性から、磁気圏-電離圏-地上の電磁気的な物理結合過程が解明される筈である。

(2) リモートセンシング観測：

最近の衛星通信やレーダ技術の進歩は、日食の現代的意義を上げつつある。地上の Ω 局からの VLF 電波や GPS 衛星の基準電波が皆既日食の陰の部分を通じた時に、地上の離れた所で観測される受信波の振幅や位相変化を検出する事によって、電離層の密度変化や光電離時定数を測定することが可能である。また、MF (中波) レーダによる高度 $30\sim 80\text{km}$ の大気風速ベクトルの観測が近年容易になったので、日食領域の大気風速ベクトルの高度分布変化や大気・電離層擾乱 (重力波) の測定から日食時の大気力学の研究の進展が期待される。

(3) 昼間大気光観測：

微弱な大気光を昼間の強烈な青空の背光のもとでは検出・観測することにいろいろ困難がある。皆既日食時に、昼間観測不可能な、例えば、ナトリウムの 5890 から 5896Å の輝線を観測することにより、大気中のナトリウムの起源が宇宙塵にあるのかそれとも海水にあるのか、また、光化学反応と時間変化から中間圏の化学と力学の相互作用の解明の糸口が得られる筈である。次に、酸素分子の 1.27 μ 放射観測から、高さ 60km 以上の中間圏のオゾン密度の推定が可能であり、最近大きな問題になっている地球環境変動の視点からも重要な研究テーマであると云える。

(九州大学・理学部・地球惑星科学科・湯元 清文)

4 天体暦：太陽位置の精密計測と太陽半径変動

海上保安庁水路部では、天体の位置を最新の力学理論に基づいて精密に計算し、天体位置表、天測暦などの航海諸暦を刊行している。

海上での船舶などの位置決定は、通常電波測位法が用いられているが、事故などにより電波航法が使用不能になったときのバックアップとして、航海諸暦は大型船舶に必ず常備されており、天文観測によるいざというときの船舶の位置決定に使われる。この航海諸暦の精度を維持・向上させるために、水路部では日食観測を続けている。

4.1 太陽位置の精密計測

太陽の位置測定技術として、日食観測は現在最も精度が高く、原理も単純で信頼性が高いことが知られている。例えば、子午環による太陽観測では、1 回あたりの角度の測定精度が 0.3 秒程度であるが、日食観測では約 0.02 秒の精度が得られている。

月の位置は、現在月レーザー測距 (LLR) によって 1m 程度と非常に高い精度で把握されており、月の暦を介して太陽の暦の検定を行うことができる。

これまで表 3 に示される地点で観測が行われてきた。

4.2 観測方法

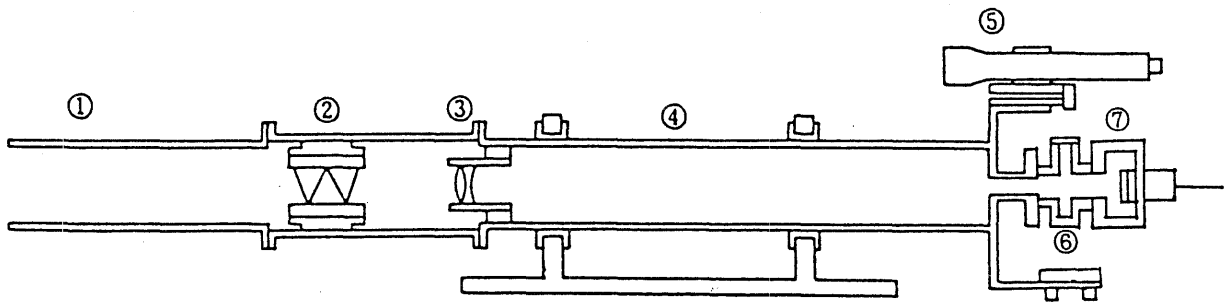
皆既日食帯の中心付近に閃光分光器を設置し、日食の第二、第三接触時の太陽を連続撮影し、それぞれの接触時刻を求める。この時刻から、月の中心と太陽の中心との相対位置が正確に求められる。

4.3 これまでの観測成果

1970 年以降の観測成果を表 4 に示す。ここで、 $\Delta(\lambda_S - \lambda_M)$ 、 $\Delta(\beta_S - \beta_M)$ 、 $\Delta(r_S - r_M)$ は、それぞれ太陽と月の黄経差、黄緯差、視半径差の観測値と天体暦との差で、水路部が算出している太陽の暦への改正量を表し、今後の暦の改訂のための基礎資料となる。

4.4 太陽半径変動の計測

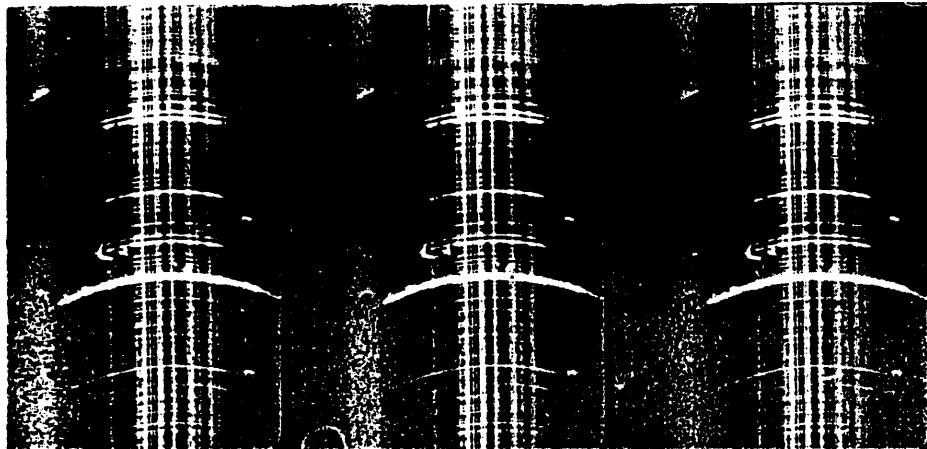
長期にわたり同一の観測・解析手法を継続していることから、本観測は太陽の位置や半径の変化を正しく捕らえているものと考えられる。これまでの観測から、太陽の半径が振幅 0.2" で振



Schematic diagram of the spectrophotographic equipments.

- ①hood ②prisms ③lens ④telescope tube ⑤guiding telescope
- ⑥filter box ⑦CCD video camera head

図 15: 閃光分光器の構造



The photographs of flash spectra near 2nd contact.

図 16: 第 2 接触時の閃光スペクトル

表 3: 水路部による日食観測

金環食	1948. 5	礼文島 (北海道)
部分食	1950. 9	旭川、小樽、白浜、倉敷、門司
皆既食	1955. 6	ベトナム
金環食	1958. 4	青ヶ島、種子島、奄美大島
皆既食	1958. 10	スワロフ島 (南太平洋)
〃	1962. 2	ニューギニア
〃	1965. 5	ハーベイ島 (ニュージーランド)
〃	1970. 3	メキシコ
〃	1973. 6	モーリタニア (西アフリカ)
〃	1976. 10	オーストラリア
〃	1980. 2	ケニア (東アフリカ)
〃	1983. 6	ジャワ島 (インドネシア)
〃	1991. 7	メキシコ
〃	1994. 11	チリ

表 4: 太陽と月の黄経差、黄緯差、視半径差の観測値と天体暦との差 (波長: 461.5 nm)

		$\Delta(\lambda_S - \lambda_M)$	$\Delta(\beta_S - \beta_M)$	$\Delta(r_S - r_M)$
1970. 3	メキシコ	$-0.17'' \pm 0.02''$	$-0.43'' \pm 0.07''$	$+0.29'' \pm 0.02''$
1973. 6	モーリタニア	$-0.26'' \pm 0.02''$	$-0.32'' \pm 0.14''$	$+0.44'' \pm 0.05''$
1991. 7	メキシコ	$-0.20'' \pm 0.02''$	$-0.50'' \pm 0.07''$	$+0.51'' \pm 0.02''$
1994. 11	チリ	解	析	中

動しているらしいことが示されているが、その変化はまた太陽が76年周期で変動しているとする Gilliland(1981) の仮説とよく調和しており、同仮説を裏付ける有力な証拠と考えられる。

(海上保安庁水路部・航法測地課・仙石 新)

参考文献及び最近の日食観測データに基づく文献

- Gabriel, A. H.: 1976, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A.* 281, 339
Gary, D. E. and Hurford, G. J.: 1987, *Astrophys. J.* 317, 522
Gilliland, R. L.: 1981, *Astrophys. J.*, 248, 1144
Ichimoto, K. et al.: 1996, *Publ. Astron. Soc. Japan* 48, 545
Hanaoka, Y., Kurokawa, H. and Saito, S.: 1986a, *Solar Phys.* 105, 133
Hanaoka Y., Kanno, M., Kurokawa, H. and Tsubaki, T.: 1986b, *Solar Phys.* 106, 95
Hanaoka, Y., Kurokawa, H. and Saito, S.: 1988, *PASJ* 40, 369
Hiei, E., Shimizu, Y., Miyazaki, H., Imai, H. and Sato, K.: 1986, *Astrophys. Space Sci.* 119, 9
Hirayama, T. and Irie, M. : 1984, *Solar Phys.* 90, 291
Kanno, M., Tsubaki, T. and Kurokawa, H.: 1971, *Solar Phys.* 21, 34
Kubo, Y.: 1993, *PASJ* 45, 819,
Kurokawa, H., Nakayama, Tsubaki, T. and Kanno, M.: 1974, *Solar Phys.* 36, 69
Kurokawa, H.: 1975, *Solar Phys.* 43, 385
Makita, M.: 1972, *Solar Phys.* 24, 59
Suematsu, Y., Saito, S., Funakoshi, Y., and Kurokawa, H.: 1988, *Solar Phys.* 116, 285
Suematsu, Y., Fukushima, H. and Nishino, Y.: 1994, in "Infrared Solar Physics",
IAU Symp. 154, 205
Takeda, A., Kurokawa, H., Kitai, R., and Ishiura, K.: 1994, *IAU Colloquium* 144, 565
Takeda, A., Kurokawa, H., Kitai, R., and Ishiura, K.: 1994, *Kofu Sympo.*, 384
Tsubaki, T., Kurokawa, H., Kanno, M.: 1971, *Solar Phys.* 21, 305

A 今後の主な皆既日食

1998年から2017年にかけて起こる皆既日食で、主なものを表5に示す。

表 5: 今後の主な皆既日食 (1998 年-2017 年)。皆既帯の緯度、経度、皆既継続時間、主な通過国を示す (括弧内は都市名、数字は皆既継続時間 (秒))。表では国と緯度経度は対応していないので注意。この表の作成に際し理科年表を参照した。

赤経の合 (UT)	日出時 経度, 緯度	正午 経度, 緯度	日没時 経度, 緯度	最大継続時間 (分)
1998.02.26 17h36m	-144, -2 コロンビア	-81, +6 (236s)、	-19, +30 ヴェネズエラ	4.1 (マラカイボ)
1999.08.11 10h51m	-65, +41 フランス (パリ)、 ルーマニア インド	+19, +47 ドイツ (ブカレスト)、	+87, +18 (ミュンヘン)、 トルコ、	2.4 ハンガリー (143s)、 イラン (113s)、
2001.06.21 11h58m	-50, -37 アンゴラ、 マダガスカル、	+1, -12 中央アフリカ インド洋	+55, -27 (243s、ルサカ)、	4.9 モザンビーク、
2002.12.04 07h39m	-2, -4 アンゴラ (55s)、	+63, -41 中央アフリカ、	+142, -29 モザンビーク、	2.1 オーストラリア
2006.03.29 10h33m	-37, -6 ブラジル ニジェール ロシア	+23, +30 (ナタール)、 (ビルマ 245s)、	+99, +52 ガーナ リビア、	4.1 (アクラ)、 トルコ、
2008.08.01 09h47m	-103, +68 北極海、	+35, +81 ロシア (147s)、	+114, +33 モンゴル、	2.5 中国
2009.07.22 02h33m	+71, +20 インド、 日本	+143, +25 中国 (成都、 (屋久島南方 (384s))	-158, -13 宜昌、漢口、	6.7 上海)、
2010.07.11 19h51m	-171, -27 チリ	-116, -22	-71, -51	5.3
2012.11.13 22h18m	+133, -12 オーストラリア	-158, -41 (タリー)、	-80, -30 太平洋	4.0
2016.03.09 02h05m	+88, -2 インドネシア	+151, +12 (パレンバン、	-144, +33 200s)、	4.2 グアム南方
2017.08.21 18h13m	-172, +40 米国	-92, +39 (ポートランド南、	-27, +11 セントルイス (160s)、	2.7 チャールストン)