

太陽の活動領域とフレアー

黒河 宏 企*

1. はじめに

星の表面でも、活動領域の消長を暗示する周期活動が観測されており、実際、星の黒点の存在を裏付ける証拠が、多数の星について得られつつある。非常に興味深いことである。それにしても、表面の30%もが黒点に覆われた星とは、又その磁場の変化によって引き起こされる活動現象とは、どの様なものであろうか。太陽では、対流層に埋もれている磁束管が対流運動に振り回されながら、表面に浮かび上がってくる様子を実際に見ることが出来る。黒点群の中に新しい黒点群が浮上してくると、必ず大きな太陽面爆発が発生する。真にダイナミックな現象である。

飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡(DST)を、他機関の研究者にも公開して3年が経過した。観測テーマも、光球、彩層、紅炎他多岐に亘り、それぞれについて成果が挙がってきている。この辺の様子については、2年前に川口市郎氏が書いておられるので参照して頂きたい(天文月報1982年7月号)。ここでは、活動領域の進化とフレアーの観測について、DSTで得られた写真を紹介しながら、活動領域の磁場の動的な姿の一端をお伝え出来ればと思う。

2. 活動領域の成長とフレアーの発生

昨年5月から6月にかけては良く晴れたものである。18日間連続観測の記録まで生まれた。丁度この期間中、NOAA領域4201の東側に浮上してきた活動領域が、見る見る大きく成長して行ったものである。図1にその一部を再現している。6月1日には、前兆らしきものさえ見られないが(図1(a),(e)),6月2日には、黒点Aの東側(右上方)に、若い磁力管群がすでに顔を出しているのが見られる(図1(b),(f))。黒点の写真とH α 単色像を合わせて調べると、光球からコロナに突き出た磁力線のループとその足下の両極を同定することが出来る。図1(f),(g)を見ると、約22時間の間に、浮上磁気ループの数も長さも急激に増大していることが判るが、ここで注意したいのは、色々な傾きを持ったループが混在していることである。これは磁力管が浮上の途中で、超粒状斑速度場等の影響を受けて、ねじられている為か、或は、すでに周囲の磁場と再結合を行なった結果なのか、明らかではない。今後この様な磁力管浮上初期の姿を数多く捕えて、詳しく調べる必要がある。図1(d),(h)には、更に3日後の姿を示してあるが、この間に約

8倍の大きさに成長して巨大な活動領域となっている。その中で、C, Dは依然として浮上中の若い磁力管群である。又E付近の磁力線は、最初黒点Bを結んでいたはずであるが、周囲の磁場とすでに、つなぎ替わって同心円状の筋模様を形成している。この様に、新しい黒点群は浮上するにつれて周囲の磁場とぶつかり、合体したり、つなぎ替わったりしながら、複雑な活動領域を形成して行く。その過程で解放される磁気エネルギーがフレアーを引き起こすと考えられるのである。

例えば図2では、2つの黒点群が隣り合わせて同時に浮上してきた為に、後続B群のS極(B_S)と前のA群のN極(A_N)とが衝突して、デルタ型の黒点配置が出来ている(図2(a),(b))。その境界に形成されつつあるフィラメントのねじれが、A_N, B_Sの逆向きの運動によって次第に大きくなり(図2(c)),局所的に溜め込まれたエネルギーが急に解放されて、図2(d)に見られる如く、フレアーがフィラメントの両側で発生しているのである。

一方、ある双極磁場の下から引き続いて、非常に傾きの大きい磁力管群が浮上して来た時には、大規模なフレアーが発生する様である。1981年10月12日の3Bフレアーの場合を見てみよう(図3)。フレアーは両黒点の反対側の端から始まり(図3(b)),急激に黒点の縁に沿って広がった(図3(d))後、爆発的に黒点暗部に向けて進入して行くのが見られる((e),(f))。ここで注目すべきことは、フレアー初期(図3(b))の輝点の対を結んでいる磁力線の方向が、両黒点を結ぶ主要な磁場配置から大きくずれていて、むしろその磁気境界線に沿って走っている黒い筋模様(ファイブリル)と同じ傾きを持っていることである。この様に互いに交叉した様な磁場配置がどの様にして出来たのか。フレアー発生前後の黒点群の進化を図4で調べてみなければならない。フレアー発生前日(図4(e))と当日(図4(f),(g))のH α 像を較べて見ると、黒点間の黒い筋模様の方向が約90度変化している事に気付く。元の両黒点を結ぶ磁力線に直角に、その真中を割って、新しい磁力管群が浮上して来ているのである。アーチフィラメント群(ファイブリル)は浮上するにつれて、その上のループと接触しては時々小規模のフレアーを繰り返しているが、図4(g)で見られるねじれの強いファイブリルの両端に近い箇所フレアーが始まった時(図3(b)),その上のループが急激に上昇し始め、ついには元の主黒点間の磁力線を引っ張り上げて、連鎖反応的磁気再結合による爆発的なエネルギー解放へと進行して行ったものと考えられる。

* 京大理・飛騨天文台 Hiroki Kurokawa: Solar Active Region and Flare

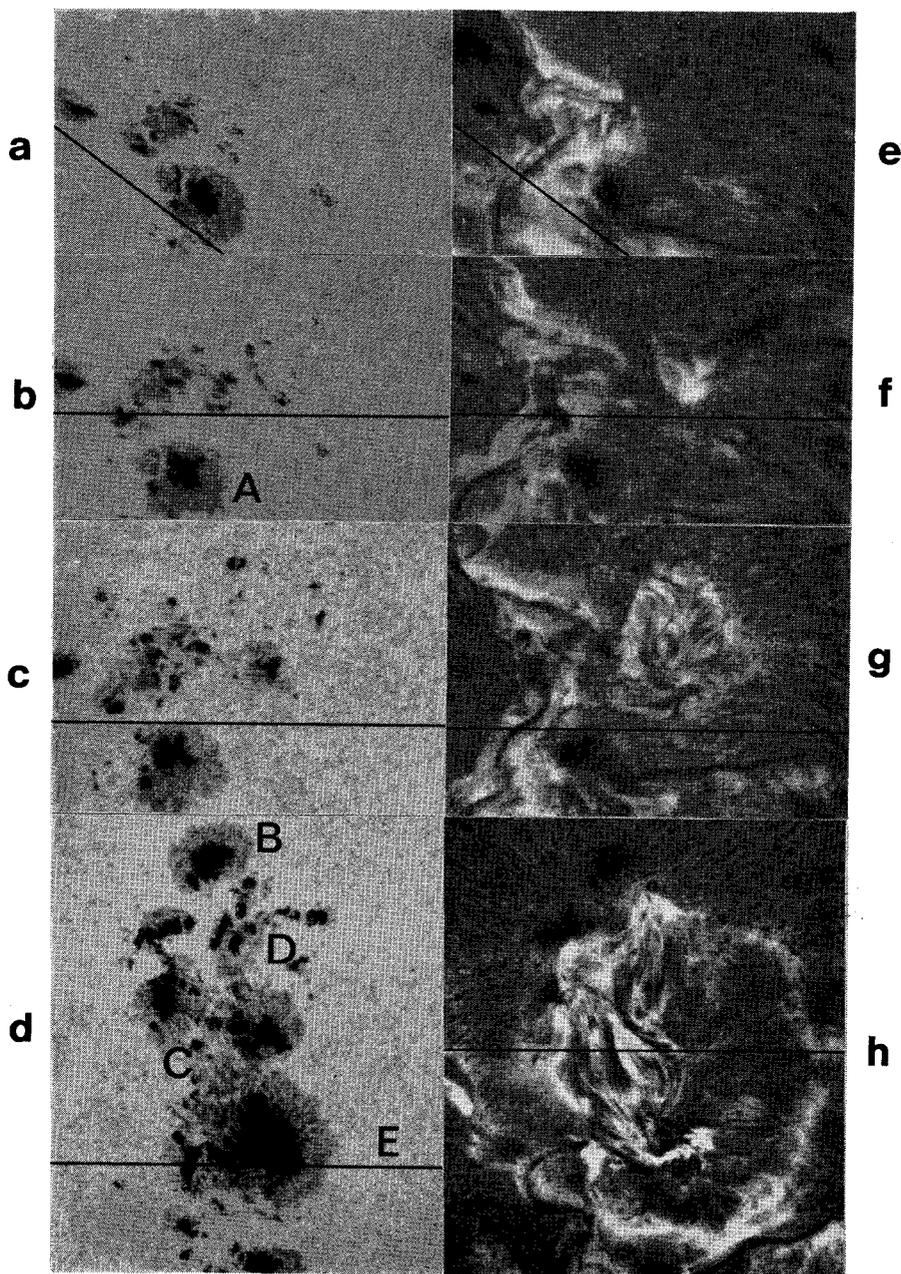


図1 活動領域が浮上してくる姿。(a) 1 June 0516 UT, (b) 2 June 0053 UT, (c) 2 June 2222 UT, (d) 6 June 0007 UT, (e) 1 June 0516 UT, (f) 2 June 0050 UT, (g) 2 June 2238 UT, (h) 6 June 0022 UT

翌日の連続光の写真では、元の黒点間に新しい黒点群が成長しており(図4(d)),その半暗部の筋の向きは、元の黒点の半暗部の筋模様と直交しているのをはっきりと見ることが出来る。この様に互いに直交した活動領域の出現は、対流層で磁力管群が大きくねじられていることを示唆していると考えられるが、どの程度普遍的な現象であるのか更に詳しく調べて行く必要がある。これに

伴うフレア-エネルギー解放機構の解明と共に、今後の重要な課題であろう。

3. H α フレアと X 線, μ 波バーストとの相関

既に見て来た様に、フレア-エネルギーの解放機構を解明する為には、黒点群の成長或はファイブリルやフィラメントの動きに現われる、活動領域磁場の進化の様子を調べることが大切であって、この故に光学観測は最も

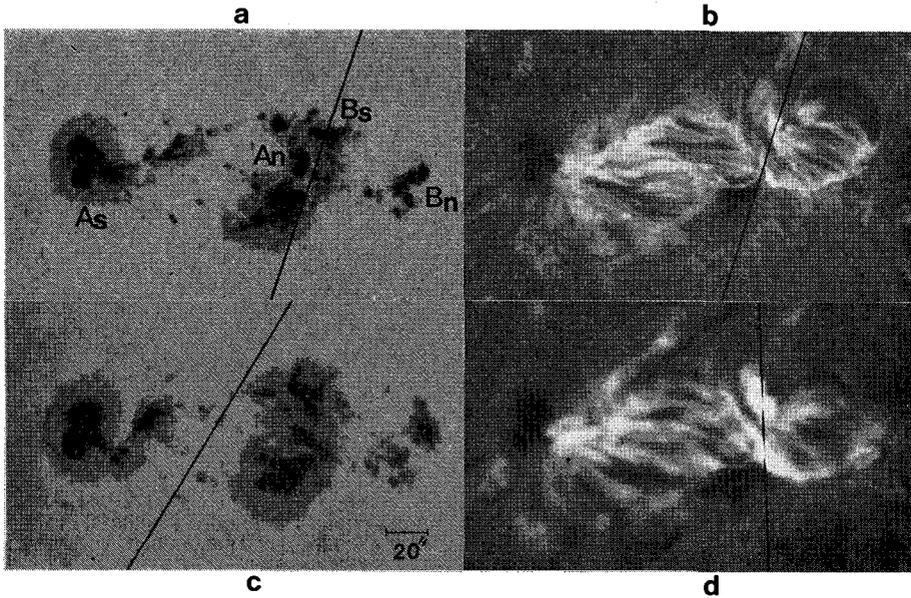


図2 黒点群の衝突とフレアー発生. (a) 10 May 2225 UT, (b) 10 May 2222 UT, (c) 11 May 0629 UT, (d) 11 May 0407 UT. A_N , B_S の間のフィラメントの両側でフレアーが発生している.

重要な手段である。又フレアー自身の発達形態を調べるについても、光学観測の空間分解能は現状で他より1桁優れている。一方、最近のX線と μ 波によるフレアー観測の成果は目覚しく、フレアーエネルギーが解放されている領域の高速粒子や高温プラズマの物理量を与えると共に、その現場の2次元像も見せてくれるようになった。この様な事から、光学観測とX線、 μ 波観測とを比較する作業が、益々重要且つ多量のものとなって来ている。

1982年3月23日0518 UTのフレアーは、DSTと「ひのとり」衛星で同時に観測された。図5(a)に示されている様に、二筋に並んでいる輝点の列が、フレアーループの両足下に対応していると思われる。これ等の輝点の光度和と、硬X線、軟X線強度の時間変化とを比較したのが、図6である。結果は従来の教科書の説明とはかなり異なるものであった。これまで、 $H\alpha$ と硬X線の時間相関については、はっきりしておらず、むしろ軟X線と $H\alpha$ 光度の時間相関が良いと考えられていたので、図6の様に、 $H\alpha$ 線と硬X線のピークが約1秒の精度で一致していることが示されたのは初めてである。もっとも、1秒に2コマという高時間分解で、 $H\alpha$ フレアーが観測されたのも又、これが初めてなのである。この様な $H\alpha$ 線と硬X線、 μ 波の一致が、フレアーのタイプによって異なるかどうかを知る事は非常に大切で、今後、時間的にも空間的にも分解能の良い $H\alpha$ フレアーの観測の数を更にふやして行かねばならない。

図5(b)には、この同じフレアーについて、高倉達雄氏から送って戴いた「ひのとり」の硬X線二次元像と、

$H\alpha$ フレアー像とを重ね合わせて示してある。等高度曲線は26~50 KeVの硬X線像で、 $H\alpha$ の輝点は黒く塗って示してある。時間的には、両方とも図6の2番目の極大期に対応している。この硬X線像はループの形をしているように見える。ループの頂上付近が最も強いX線を出しているが、ループの両足下と思われる箇所にも強い放射源があって、しかも $H\alpha$ フレアー輝点の位置と良く一致している。恐らくもっと早い時期には、両足下の硬X線源が、更にはっきりと見えたのではないかと想像される。

以上の様な $H\alpha$ とX線の時間的、空間的相関の結果は、フレアーループ中で解放された高エネルギー流が、コロナから彩層に伝播する機構を考える上で、次の様な示唆を含んでいる様に思われる。即ち、まず初期のインパルスフェイズでは、高速の電子ビームが彩層に突入して、硬X線を出すと共に彩層を加熱し、その後高温プラズマがループを満たすフレアー後期では、熱伝導流が主流となっていると考えられるのである。電子ビームが彩層を加熱していると思われる間接的な証拠は他にもある。例えば図5(a)で見られるループ両足下の $H\alpha$ 輝点が、互いに約2秒前後の時間差で同期して明るくなるという事実である。この両足間を結ぶ半円形のループの長さは約50,000kmと見積もることが出来るが、これだけ離れた2点を2秒前後の時間差で同時に加熱する為には、熱伝導流や、磁気流体不安定現象の伝播速度では遅過ぎる様である。この様な議論は、フレアーの種類によって異なることも考えられるので、今後更に詳しく調べて行く必要があるだろう。

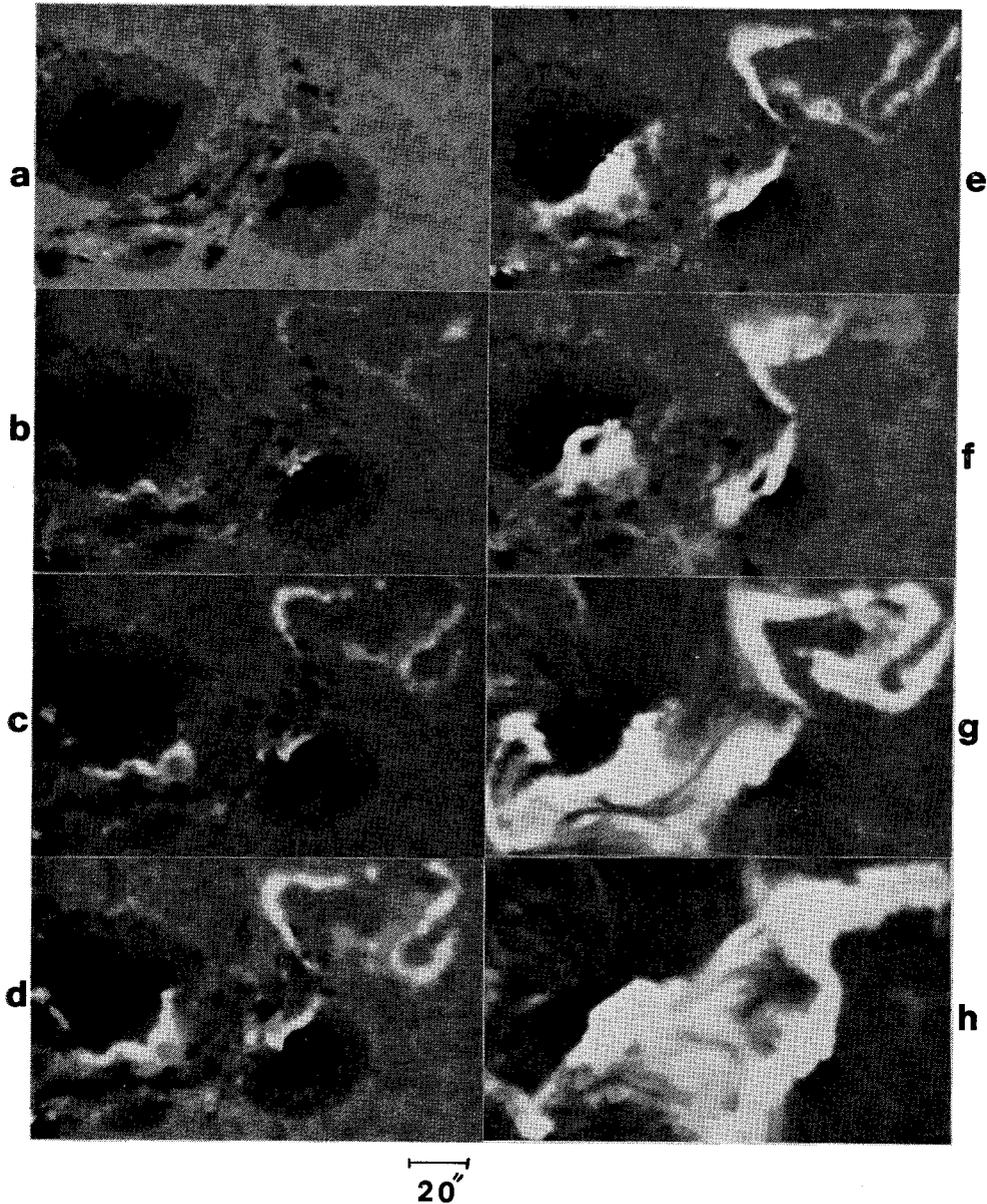


図3 1981年10月12日の3Bフレアー。(a) 0619 UT, (b) 0623 UT, (c) 0624 UT, (d) 0625 UT, (e) 0627 UT, (f) 0630 UT, (g) 0626 UT, (h) 0649 UT。(a)~(f)は $H\alpha - 1.0 \text{ \AA}$ で (g), (h)は $H\alpha$ 中心で撮影したもの。

4. フレアーの分光観測

フレアーループからの加熱に対し、彩層が熱的、力学的にどのような反応を示すかを調べる為には、フレアーの分光観測を行う必要がある。フレアーの分光観測は一段と難しい。フレアーの輝点をスリット上に固定するのが難しいのである。シーイングの良い時にフレアーが起こる確率は小さいので、常にフレアー輝点はスリットから出たり入ったりすることになる。もっともそれよりもまず、フレアーの起こりそうな場所で待ち構えていて、そ

の兆があれば、素速く太陽像を動かして、フレアー輝点をスリット上に載せる忍耐と敏捷さこそが、前提条件なのであるが。

さて、フレアーにおける $H\alpha$ 輝線の輪郭が非対称で、赤方超過のあることが、以前から知られているが、その原因ははっきりしていない。1981年から1982年にかけて、DSTで行なった $H\alpha$ スペクトル観測の例が図7に与えてある。真に顕著な現象である。これ等の観測を解析した結果、フレアー初期において、フレアーループの

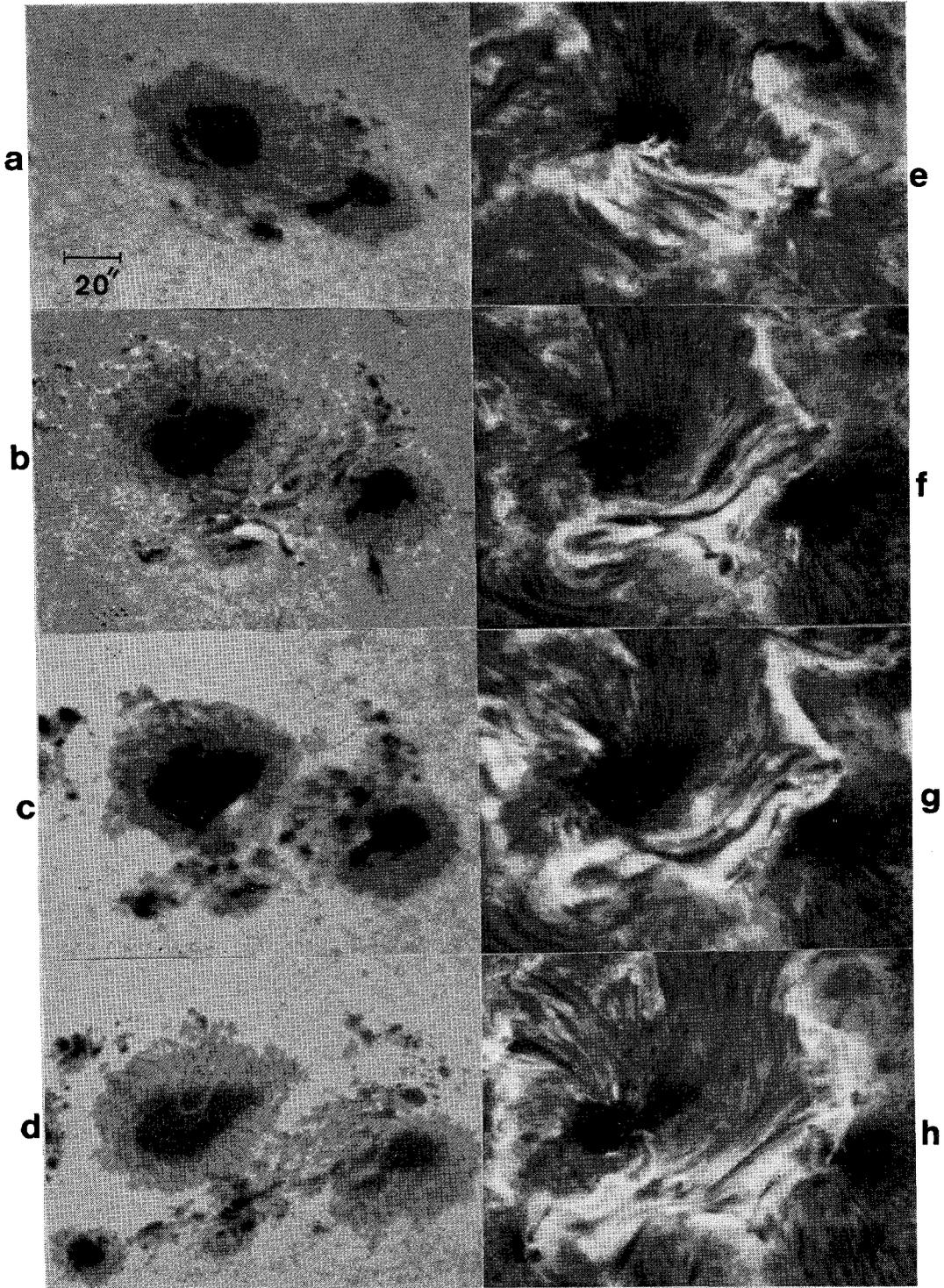


図4 1981年10月12日の3Bフレアを起こした活動領域の進化。(a) 11 Oct. 0100 UT, (b) 12 Oct. 0203 UT, (c) 12 Oct. 0627 UT, (d) 13 Oct. 0127 UT, (e) 11-Oct. 0308 UT, (f) 12 Oct. 0116 UT, (g) 12 Oct. 0532 UT, (h) 12 Oct. 2343 UT

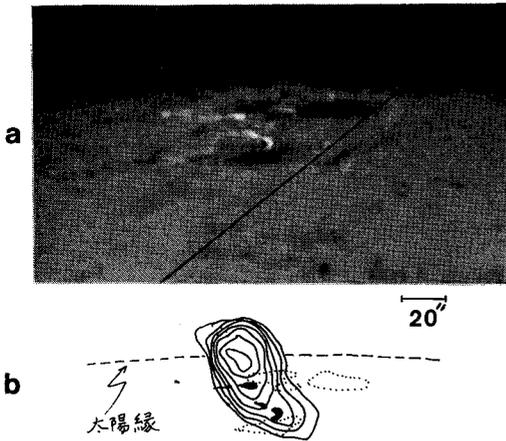


図5 1982年3月23日のフレアー。(a) $H\alpha-1.0 \text{ \AA}$ のフレアー輝点, (b)「ひのとり」の二次元像と $H\alpha$ 輝点との位置関係。等高線は硬X線像で, $H\alpha$ 輝点は黒く塗ってある。点線は黒点暗部を示している。

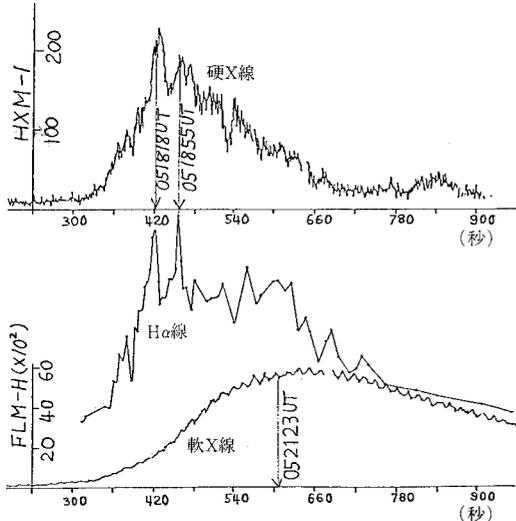


図6 1982年3月23日のフレアーにおける $H\alpha$ と X 線(「ひのとり」)の時間相関。 $H\alpha$ と硬 X 線の一致が非常に良い。

根本の彩層中で, 40 km/s から 100 km/s に及ぶ大きな下降運動が生じていることが明らかになった。図8に1982年12月29日のフレアーについての結果を, 空電研究所の μ 波バーストの時間変化と共に示しているが, μ 波バーストの立ち上がりと同時期に, フレアー彩層内に急激な下降運動の増加が見られる。これこそが $H\alpha$ 輝線の赤方超過の正体であった訳である。この下降運動の原因としては, フレアーープからの加熱によって, 彩層コロナ遷移領域の圧力が急激に上がる為, その部分の彩層が光球の方に向かって押し下げられると考えると良さそうである。

一方フレアー初期の同じ時期に, 高温プラズマが, 300

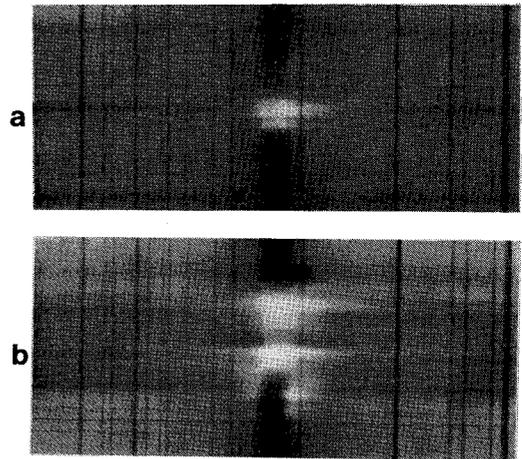


図7 フレアーの $H\alpha$ 線スペクトル。(a) 22 May 1982, (b) 20 June 1982. $H\alpha$ 輝線が長波長側(右側)に変位していることが判る。

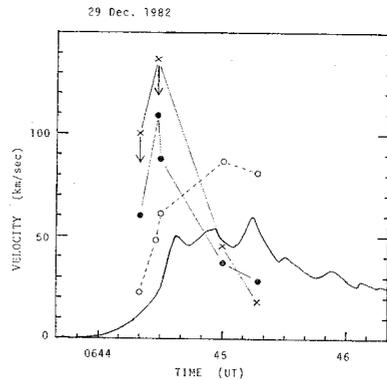


図8 フレアーの分光観測の結果, 黒丸と×印はフレアー彩層中の下降速度を表わし, 白丸は $H\alpha$ 線強度の変化を表わしている。図下方の曲線はマイクロ波の時間変化を示す。

km/s ~ 400 km/s の高速で上昇運動している事実が, 最近の軟X線スペクトル観測で見付かっており, 加熱された彩層の上層が, フレアーープ中に爆発的に流出しているものと考えられている。この様に, 数千万度の高温プラズマの上昇運動と, 低温の彩層内の下降運動が, フレアーープからの彩層加熱という同一の原因によって, 同時に引き起こされているらしいことが, X線と $H\alpha$ 線のスペクトル観測から明らかになって来た訳で, 非常に興味深いことである。

5. おわりに

表面に浮上して惑星間空間に抜け出て行く天体磁場の姿を見ることが出来, 又その過程で引き起こす様々な活動現象を, 個別に分析出来るという点で, 太陽は唯一の天体であろう。第2節でも述べた様に, 空間分解能の良い観測によって, 光球からコロナに顔を出して来る磁力管群の初期の形態変化を詳しく調べ, 更にその後の進化

を追跡して行くことが、天体磁場の動的な姿を理解することに役立つものと思われる。この磁場の活動にかかわる色々な表面現象について、DST が、今後更に知見をふやして行ってくれるものと期待している。

書 評

天体力学入門 (上, 下)

現代の数理学シリーズ ④, ⑤ 長沢 工 著

(地人書館, 1983年10月10日刊, 上下とも224頁, 2000円)

上下2巻の本書は、歴史が古く幅広い天体力学のなかで、天体暦等にあらわれる太陽系内の天体の位置を求めるのに必要な摂動論の計算的側面の解説に主眼がおかれている。数式がほとんどない天体力学の啓蒙書とか天体の位置計算の本にでてくる軌道要素の変化とか摂動という言葉を見て、具体的にどのような計算が行なわれているのかということに関心のある方には手頃な本である。

上巻は力学の基礎と2体問題が取り扱われている。下巻が本書の主たる部分であって、摂動関数の展開、定数変化法による摂動論、直接に座標を求める摂動論、正準変換に基づく摂動論が解説されている。上巻で要求される数学と力学の知識としては高校ないしは大学初年程度であって、かんでふくめるように墾切ていねいに計算過程が示されている。他書を参考にせず上巻は最後までたどりつけるであろう。下巻は上巻とうってかわってむづかしい。しかし上巻同様に途中の計算は、ほとんど省略なしに書かれているので、紙と鉛筆を用意して読者自ら計算しながら読み進めば、理解が深まるであろう。とはいうものの下巻は独習者を混乱に落とし入れるか、間違った理解をうえつける個所が多々ある。そのうちの主なものをいくつか上げてみよう(本書を購入された方のために)。

1) 第9章で微分方程式を解くひとつの方法としての定数変化法が解説されている。摂動がある場合の方程式の一般解は、摂動がない場合の一般解と摂動がある場合の特殊解の和であると説明されている。これが成立するのは、方程式が線形であり、かつ摂動が時間の関数のみの場合である。本書で議論されている方程式は非線形であり、かつ摂動関数は従属変数も含んでいるので、上記のような考えでは方程式は解けない。何か所にも特殊解という言葉がでてくるところを見ると、どうも著者は非同次線形方程式と非線形方程式とを混同しているらしい。

2) 天体力学で重要な概念のひとつである接触軌道要素の説明が不十分である。接触軌道要素から決まる2次曲線が解曲線と接しているのだから、接触という言葉がついているのであって、本書に書いてあるように定数変化の式を導くときに不足する3個の条件式をかってに決めてし

まうと、接触しないことになる。

3) 第10章の座標の摂動の結論のところ、1次の摂動の範囲内で $\delta z=0$ としているのは間違いである。この間違いは、摂動関数が軌道傾斜角を含んでいないと、著者が誤解していることによる。1次の摂動でも軌道面は変動する。

4) 第11章の正準変数による解法のところ、一般化座標を消去する母関数を式 11-65 のように表現しているのは基本的間違いである。このように表現できるのは、力学系が変数分離できる、すなわち正準変換という難しいことを持ちこずに他の方法で解ける場合に限る。

5) 第8章で求められている摂動関数は離心率(e)と軌道傾斜角(i)が0の場合である。次に求めるべきものは e と i について1次であって2次ではない。これに関連して、 e と i が0である項が摂動関数の中で主要項であるが、必ずしも大きな摂動を及ぼすとは限らないことに注意しておこう。摂動関数の中で e と i について1次とか2次の頃からも摂動の主要項がでてくる(2天体の公転周期の比が整数比に近くなくても)。

講義ノートをもとにして教科書を作る場合には、講義した人に一読して間違いをただしてもらうように、下巻は原稿の段階で専門家に眼を通してもらうべきであった。早い機会に改訂されることを望む。

上巻、下巻に全く同じ内容の楕円運動の展開式がテーブル形式で42頁にわたって付録として掲載されている。第8章の摂動関数の展開では円運動の場合しか考えていないし、他の場所でも用いられていないので、この付録は不必要である。第10章の座標の摂動は、種々ある摂動論の中でも特に技巧的な方法であって、入門書としての本書の範囲外のものである。この直接に座標の摂動を求める方法は、計算機による数式処理を用いて高精度の理論を作るには不向きである。したがって評者の個人的感想としては、付録と第10章を合わせて約80頁は、第9章の定数変化法の最後でわずかに述べられている応用のあたりを充実するのに用い、具体例を与えて数値的結果まで求めて見せる方が独習者に親切であろう。

本書には Brouwer の “Methods of Celestial Mechanics” しか参考書として示されていないので、以下に本書が取り扱っている分野をより良く理解する本を紹介する。1章から5章は、古典力学とか初等力学とか単に力学が標題の一部に入っている本、9章は微分方程式の本、11章は解析力学とか一般力学が標題の一部となっている本ならどれでもよい。6, 7, 8章については、日本語で書かれているものとしては、高価ではあるが荒木俊馬 “天体力学” (恒星社)。英語で書かれた教科書としては A. E. Roy の “Orbital Motion” (Adam Hilger Ltd.), W. M. Smart の “Celestial Mechanics” (Longmans)。Roy の本は2体問題、多体問題(三体、制限三体問題)、摂動論、数値積分、太陽系の安定性と進化、ロケット力学、惑星間・恒星間飛行、軌道決定、連星等と話題は豊富で、取扱いが初等的でわかりやすい。

(木下 宙)