

# 太陽磁場形態学

田 中 捷 雄\*

今から 30 年前には太陽大気を比較的一様な静力学平衡にある電離ガスと考えて差支えなかったであろう。現在は太陽大気が磁場のみちあふれたプラズマであり、絶えず変化を起す現象そのものである事が分っている。太陽大気に対する描像は Babcock による精密な磁場測定器、マグネトグラフの発明以来大きく変わったといつてよい。マグネトグラフは初め場所の分解能が悪かったが現在は角度数秒の精度で短時間に太陽のかなり広い領域の磁場の地図を作る事が出来る。しかしマグネトグラフによる磁場の視線方向以外の成分の測定にはまだ難点があり、また彩層コロナの磁場を測る事は非常にむずかしい。一方彩層やコロナの微細構造が色々な単色像により明らかになるにつれその磁場の形態を精密に推定する事が出来るようになった。これらの観測の集積により磁場の 3 次元構造、エネルギー放出に於ける磁場の役割が明らかになりつつある。特に太陽活動域は磁場の浮上によって生れ、その後の発達が光球から出た磁場が既存の磁場と起こす再結合や光球下の対流運動により歪曲される過

程で起る事が分った。フレアはこの活動域の歴史の中で激しい歪曲のためエネルギーを溜めこんだ磁場が急激にエネルギーを放出する現象と考えられる。活動域以外の静かな領域の構造も磁場により支配されておりスピキュールやモトルといった彩層の微細構造も磁気流体力学的現象である。活動域と静かな領域の相異は磁場の形態の違いとそのエネルギーの差に帰せられるだろう。ここでは現在明らかになりつつある太陽大気の磁場の構造を主として彩層磁場の時間的変化の観点から記述してみる事にする。

## 1. 磁場の浮上

活動域は新しい双極磁場(黒点)の浮上により始まる。黒点が誕生する時  $H_{\alpha}$  の単色像でみると図 1 のような特長的な形を呈する事が分っている。これは AFS (アーチ型フィラメント系)とも磁場浮上領域 EFR (Emerging Flux Region) とも呼ばれ磁場の双極子とそれを結ぶ磁力線とからなる。図 1 にみえる周囲より暗い流線は磁力

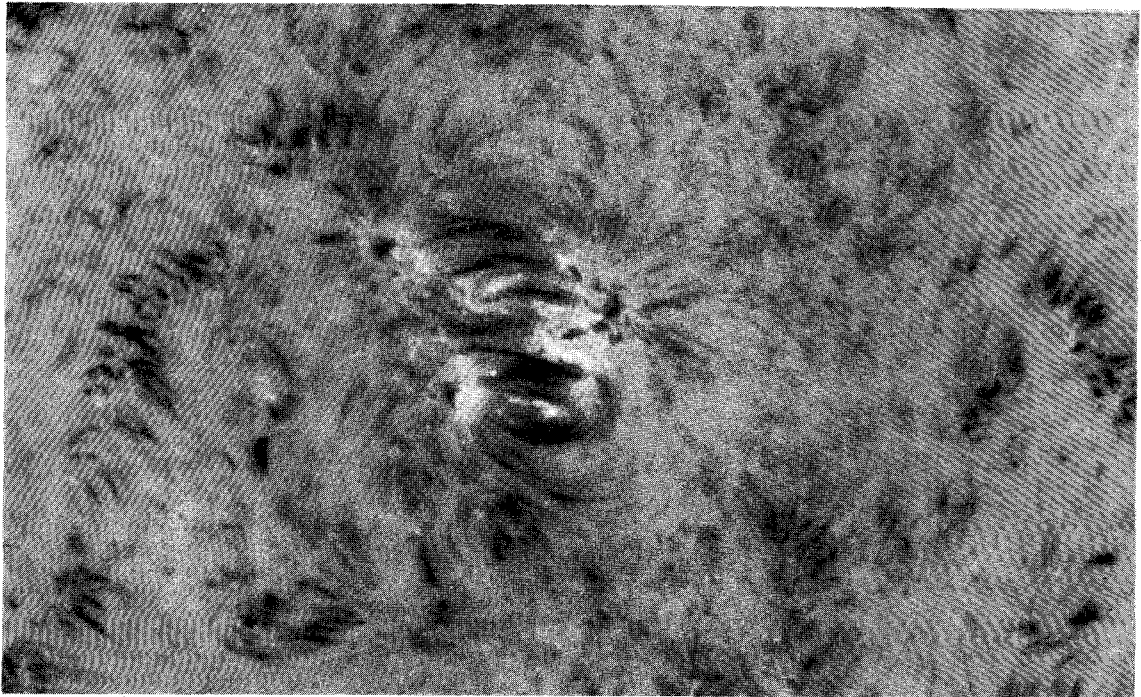


図 1  $H_{\alpha}-0.7A$  でみた EFR (磁場浮上領域)

\* 東京天文台  
K. Tanaka, Structures of Magnetic Fields in the  
Solar Atmosphere.

線に沿った密度の濃い部分であり沢山の輝点は磁力線が光球から顔を出した所でエーラーマンの爆弾と呼ばれる。光球下の磁場は浮力により浮上すると考えられ一旦光球上に出ると自らの圧力でコロナに向かい膨張する。磁力線の密な光球との切口が黒点としてみえるわけだが、膨張に従いその切口間の距離は増していく。2つの黒点を結ぶ磁力線の中央でガスが磁力線の膨張と共に上昇しその両端ではガスが黒点に向ってすべり落ちる様子が分光的に確められた。

EFR では磁場の双極子をほぼねじれない磁力線が結んでいるが、これは磁場のエネルギーの最も低いポテンシャル磁場でよく近似される事が分る。EFR の軸はしばしば自転方向（東西方向）と角度をもつ。光球下に横たわる磁場はおおむね自転方向にそろっていると考えられるのでこの角度のずれが大きい程 EFR が光球下に潜在的に持つ磁場のよじれのエネルギーが大きい事になる。事実角度のずれが大きい EFR 程後になって大きな活動を起す確率が高い事が知られている。さて EFR は平均すると一日に2個現れるがその多くは数日で拡散してしまう。既存の活動域のそばに生れた EFR は磁場の再結合により古い活動域にとりこまれ新たなフレア活動

の端緒になる。また相前後して生れる EFR 複合体は持続する複雑な活動域を作りやすい。最近 EFR の数に關して新しい観測が付け加えられた。マグネトグラフで見ると黒点としてはみえない EFR が一日に約 50 個も生れるというのである。この数はスカイラボでとられた軟 X線写真に現れた小さな輝点の数と一致する。このみえない EFR は太陽活動が下り坂に入った現在でも太陽面上に一樣に分布してみられ太陽活動周期のダイナモ理論への新たな問題点となるであろう。

## 2. 活動域の発達（磁場の変形）

EFR は単純なきれいな形をしているが発達した活動域は非常に複雑な形を呈する(図 2)。活動域の変形は主として活動域にある速度場か新たな EFR との再結合により起る。太陽大気中では磁場が流体（ガス）に凍結しているので光球下に水平方向の流れがあるとその上の磁力線をねじる働きをする。このような流れとしては大きな対流（超粒状斑）と不規則な流れの場が考えられる。もう一つの変形の要因である磁力線の再結合については直接みる事は出来ないが情況的に起っている事が推察される。そもそも EFR が浮上する時その内側は新しい強

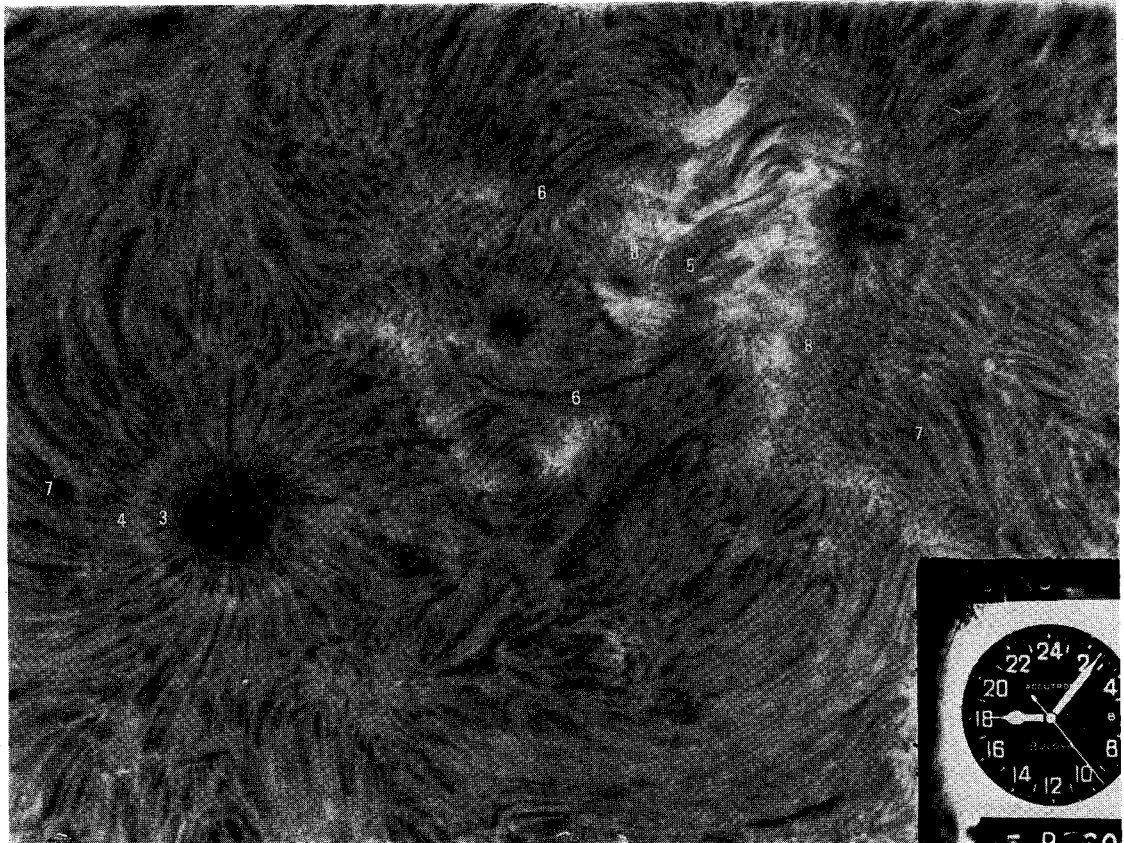


図 2  $H_{\alpha}$  0A でみた活動域。数字の説明は図 3 を参照。

い磁力線が一杯つまっていて上にある既存の磁場を押し  
のけるが EFR の双極子の外側は既存の磁場と再結合を  
して新しい安定状態が生れるであろう。一般に EFR は

後述の単極領域に生れるがこれと同磁極の黒点から外  
側に出る磁力線は周囲に滑かにつながる。この黒点の周  
圍にははっきりした半暗部 (penumbra) とその同心円  
上に超半暗部 (super penumbra) が出来る (図 3-b)。そ  
れに対し単極領域と異なる磁極の黒点は単極領域と再結  
合を行い閉じた磁力線が出来上る。その場合活動域と単  
極領域の境界にはフィラメント (filament) と呼ばれる暗  
条の構造がみられる (図 3-a)。EFR は2つの大きさの  
対称的な黒点として生れるが数日たつと一方の黒点 (大  
抵は自転方向に対し従属する側のもの) が縮みいわゆる  
 $\alpha P$  型の黒点になる事が多い。この型は新たな EFR の  
出現がない限り活発にならない。 $\alpha P$  型の黒点は発達し  
た半暗部を示す。

半暗部は磁力線が太陽面に垂直にたっている暗部から  
急に磁力線が水平になり出した所に相当し半暗部の外側  
のへりで磁力線は一度太陽面に着陸するように見える。  
着陸点にそって明るい輝点 (エラーマンの爆弾) が沢山  
みられる。磁力線は再度そこから外側に向って離陸しま  
た着陸して超半暗部を作ると考えられる (図 3-b)。最近  
 $H\alpha$  の単色像の連続撮影により暗部から輪状に半暗部へ  
向って周期的に伝播する明暗の波がみつかった。この半  
暗部波に関連して暗部に振動がみつかった。暗部の振動  
の周期は約 150 秒であるのに対し半暗部波の間隔は約 2  
倍である。この現象を暗部に於ける振動的対流とそれか  
ら出るアルフベン波とする解釈が提案されている。

さて EFR のその後の発展をたどってみよう。EFR の  
内側は  $H\alpha$  で非常に明るく輝いておりその明るさは磁力  
線の浮上がやむまで持続する。双極黒点の間の距離が広  
がるにつれこの明るい部分はプラージュ (plage) として黒  
点近傍に残る (図 3-b)。プラージュは粒状の構造をもち黒  
点暗部と同じく磁力線が太陽面から垂直につき出た切口

に当る。但し磁場の強さは黒点より大部小さく数百ガウ  
スである。一般に磁場の垂直成分が大きいプラージュ程  
彩層が明るいという経験法則がある。

プラージュのお互いに向い合ったN極とS極が接する境  
界は FTA (Field Transition Arch) と呼ばれる切れぎれ  
の短い磁力線で結ばれる (図 2, 図 3-b) これは AFS  
が進化したものだが少しよじれをもつ。FTA はN極と  
S極を至近距離で結ぶ連結であるがもっと遠まわりをす  
る連結も存在し Thread と呼ばれる。N極とS極のプラ  
ージュの中心部は背の高いみえないアーチで結ばれると考  
えられる。この他磁場の境界を特長づけるものとして前  
述のフィラメントがある。フィラメントには活動域と静  
かな領域の境界に出来るもの (図 3-a) と活動域の内側  
の双極黒点の境界に出来るもの (図 3-c) の2種類ある。  
前者は静かなプロミネンスと同じだが後者は活動的な背  
の低いプロミネンスに相当する。フィラメントは非常  
によじれた磁力線に支えられている密度の濃い領域と考  
えられている。プラージュのへりから太陽面に対し鋭角につ  
き出した磁力線には Fibril という名前がつけられている。  
これは遠方の反対極につながるものだが途中の部分は  
 $H\alpha$  で見えず軟X線写真に明るい線条構造としてうつる。

EFR の出現場所の統計をとると既にある活動域の内  
側や近くに生れる確率が高い事が分る。この理由はまだ  
不明であるがこの傾向は活動域をより複雑に又活発にす  
る効果をもつ。多数の EFR の複合により複雑にみえる  
活動域の構造も上述の色々な磁力線の形とその境界形態  
の組合せからなるといえる (図 2, 3 には色々な磁力線  
の名前が示してある)。

磁場の境界形態は図 3 に示されるように3つに分類さ  
れる。これらの序列は活動域の歴史的発展を物語る。ま  
ず双極黒点が AFS (EFR) の形で浮上した後、対流層  
の中の流れによって黒点間に相対運動が起る。相対運動に  
わずかでも回転運動の成分があれば磁力線によじれが生  
じ FTA の形になる。更に相対運動が主に回転の場合よ

じれはひどくなり図 3-c にみら  
れる活動域フィラメントにな  
る。

これら3つの磁力線の形態は  
フォースフリー磁場で表示され  
る事が示される。フォースフ  
リー磁場では磁場の作る電流と磁  
場が平行で物質には電磁力が働  
かない。彩層ではガス圧が磁気  
圧に比べて小さいのでもしフォ  
ースフリーでなければガスは激  
しい運動を起すだろう。このた  
め彩層、コロナではフォースフ

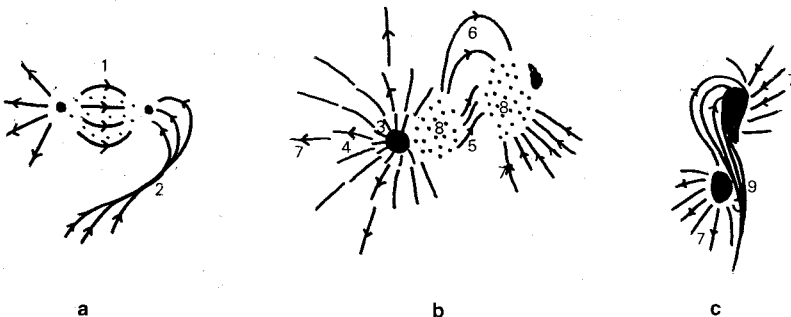


図 3 活動域の色々な磁力線

- 1 AFS (EFR)
- 2 フィラメント
- 3 半暗部
- 4 超半暗部
- 5 FTA
- 6 スレッド
- 7 ファイブリアル
- 8 プラージュ
- 9 活動域フィラメント

リー磁場が安定な状態と考えられる。その際電流と磁場の比例定数が磁場のエネルギーを表す。即ちこの比例定数が大きい程同じ磁場の強さに対して大きい電流が流れる。この定数が0の時にエネルギー最小のポテンシャル磁場で AFS (EFR) がこれに当る。FTA からフィラメントに進化するに従い比例定数は増え蓄積される磁場のエネルギーは増える。図 3-c のフィラメントが一番高いエネルギーをもち大きなフレアを起しやすい (1972 年 8 月のフレア群はその典型例であった図 4 参照)。一般には磁場と電流の比例定数は場所および時間の関数であるが最近一つの活動域全体の磁場の構造が一つの比例定数を与えて近似出来る事が示された。彩層磁場の理論的計算はマグネットグラフによる光球磁場の垂直成分を境界値として与えて行われる。

フォースフリー以外の磁場の形態として磁気中性面 (neutral sheet) が理論的に考えられている。これは平行で互に向きの異なる磁力線の境界領域であるがフレアのモデルとして盛んに使われる。しかし彩層の磁場の形態は局所的部分を除きフォースフリー磁場によりよく合致する事が示されている。

活動域の磁力線が  $H_\alpha$  の彩層で大部分閉じているという事はそれらが非常に低く光球にへばりついた構造である事を意味する。しかし磁力線の上部構造 (例えばブラージュの上) とか他の活動域との連絡はコロナを見る事のできる波長により調べる必要がある。スカイラボで観測中の軟 X 線像はコロナ低部の磁場の形態を知る絶好の資料である。それによると遠方にある 2 つの活動域を結ぶ大アーチ構造や明るい部分が点状ないし閉じた磁力線の構造をもつ事などが明らかになった。コロナの磁場をフォースフリー磁場と比べる研究は現在なされていない。ただ日食にみられるコロナの密度の高い部分の模様がポテンシャル磁場で比較的よく表わされる事が示されている。

### 3. フレア

変形をうけ歪んだ磁場はフレアにより急激にエネルギーを解放する。エネルギー解放の仕方については現在まだ諸説が入りみだれた

状態であるがここでは磁場の変化の仕組を暗示するいくつかの観測事実を述べてみる。まずフレアが起る前には必ずといってよい程新しい EFR が近くに誕生する。これは新しい磁場の浮上が歪んだ磁場の再結合に何らかの役割をもつ事を意味する。 $H_\alpha$  フレアは普通磁気境界線の両側が明るくなるが  $H_\alpha$  でみえる磁力線の模様からみてこの境界は FTA か、フィラメントの形態をとる。従来から理論的に予想されてきた磁気中性線 (面) はフィラメントの下部構造には存在しない。それはフィラメント下部の閉じた磁力線から開いた磁力線に移り変るところに存在すると考えられるが詳しい事は分っていない。

さてフレアの起る前あるいは最中に光球に異常な速度場が存在する事が近年見つかり出した。これは太陽面に水平方向の流れと解釈される。1972 年 8 月 7 日の大フレア (表紙) では磁気境界線をよぎる 8 km/s の大きな流れが一時的に観測された。これらの速度場を直接フレアに結びつける観測はまだ不足しているが磁場の再結合のひきがねと考えるのが自然であろう。その場合フィラメントのようなずれ (shear) をうけた磁場をほぐすきっかけを作ると思われる。

フレアの最中に磁気境界線をまたいでループプロミネンス (磁力線) が橋渡しをするのがみられる。これらのループは初めフレアの前に存在したフィラメントとほぼ平行に現れ次第にフィラメントに対する角度を増して現れる。フレアの末期にはループは磁気境界線 (フィラメ

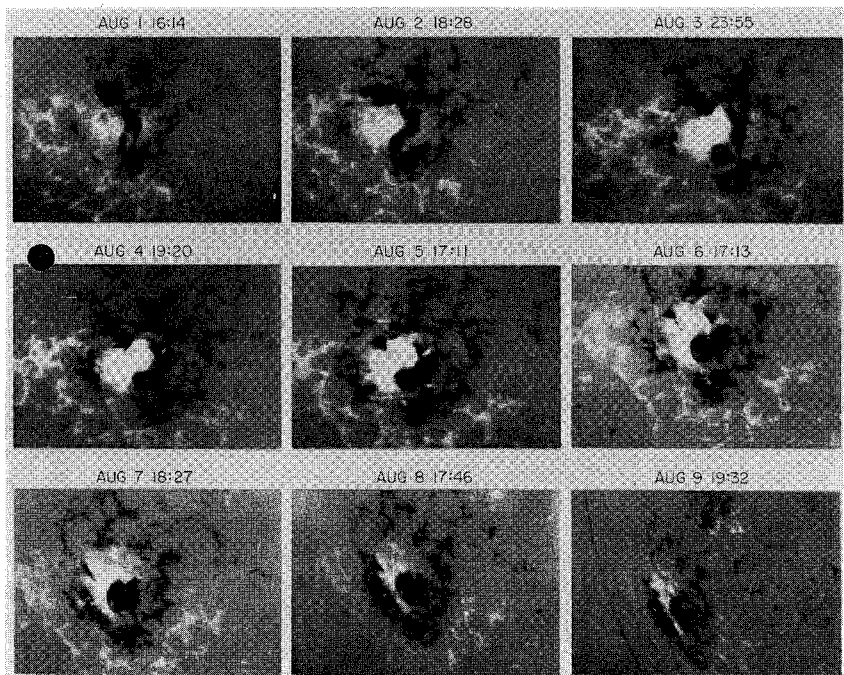


図 4 1972 年 8 月のフレア活動域の光球磁場とその変化。黒い部分は N 極、白い部分は S 極を表す。(ビデオマグネットグラフによる写真)

ント)を直角によぎる。これは恰も shear をうけた磁場 (フィラメント) がエネルギーの低いポテンシャル磁場に移り変るようみえるが実際のこの変化から磁場のエネルギーの変化を計算するとフレア中に放出される諸々のエネルギー (主として軟X線) に等しい事が分った。ループプロミネンスは磁場の再結合の結果として現れると考えられるが具体的な再結合の過程は今のところ不明である。従来理論的に提案された一次元または二次元的な磁気中性面に於ける再結合よりも3次元的な位相学的再結合を考えるべきであろう。フレア時のループにみられる磁場の形態の変化は双極黒点が生れて次第によじれを増していく過程 (図3) の丁度逆である事に気付く。しかし両者の時間の規模は約20倍も違う。この事から数日かかって対流運動によりエネルギーを蓄積し続けた磁場が数時間の間にその一部が緩和して低エネルギー状態に移るのがフレアであるという仮説が導かれる。いずれにしてもマグネットグラフによるフレア中の光球垂直磁場の大きな変化は見つかっておらず上述のように水平成分の変化に限られるという見方が有力であろう。

#### 4. 静穏領域の磁場の構造

活発な活動域の磁場は太陽面にへばりついた閉じた構造をもつが活動域から離れるに従い磁場は背丈の高いあるいは開いた構造をもつようになる。活動域のブラージュの縁から静かな領域に向けて Fibril という細長い構造がのびている事は前にも述べた。このブラージュ (磁場の立っている所) と Fibril (磁場のねている所) の関係に似た構造が静かな領域に網目状に点在する。ブラージュに相当する明るい部分はブラジェットまたは明るいモトルと呼ばれ垂直磁場の支配する狭い領域である。活動域の Fibril に対応してブラジェットから放射状にスピキュールまた

は暗いモトルという細長い暗線がのびている。これらの側面および俯瞰図はブラージュと共に図5に示される通りである。スピキュールはファイブリンに比べて太陽面となす角度が大きくそのため  $H_\alpha$  でみえる部分の長さは短い。

静かな領域にはスピキュール—ブラジェット構造が超粒状斑 (super granule) の縁に網目状に分布している。これは磁場が超粒状斑の対流によってはきよせられるために超粒状斑の寿命約1日で分布の形が変る。ブラジェットの真下の小さな粒状斑の境界には非常にこまかい大きさが0.2秒 (太陽面で150km) の明るい粒々が見つかり filigree (金物細工) と名づけられた。静かな領域でも磁場が filigree に凝集しその大きさは1000 Gauss を超えると考えられるだろう。現在のマグネットグラフの分解能ではいくつかの超粒状斑を含むかなり広い領域に亘って磁場の極性が同じでいわゆる単極領域 (unipolar region) を形作る。スピキュール—ブラジェットに一方の極をもつ磁力線が遠方の別の単極領域につながっているのかあるいは惑星間空間に向けて開いているのかははっきりしない。しかし最近見つかったコロナの穴 (coronal hole) と呼ばれる極紫外域の暗いコロナの部分は後者に相当すると考えられている。コロナの穴の真下にある彩層の網目構造は周囲に比べ目立たなくブラジェットも暗い。

スピキュールが磁力線の根元に近い所の密度の濃い部分である事はほぼ疑う余地はないがその機構については沢山の説がある。それらをここで紹介するのは差控えるが大きく分けて単極磁場中のガスの流れあるいは磁気流体波と磁場の両極が混合した領域での磁気中性点に於ける不安定現象がある。後者は現在のマグネットグラフの観測結果に矛盾するが観測における場所の分解能はスピキュールの直径よりも大部悪いので一概に否定出来ない。最近非常によい観測条件のもとで一本にみえるスピキュールが実は2本に分解されその中間に明るいモトルという筋が存在する事が明らかになった。この明るいモトルが毎秒約50kmの速さでブラジェットから外側にのびていく時両側に2本のスピキュールが現れる。この現象からスピキュール—ブラジェットがコロナ加熱に関係する事が予想される。

超粒状斑の網目構造の内側には  $H_\alpha$  や K 線でみてグリーン (grain) と呼ぶ小さな粒状物がつまっている。これと磁場との関係は不明だが絶えず3分周期のはっきりした振動がみられる。ブラジェットやブラージュの大気振動の周期は5分であり周期の違いは磁場の水平成分の有無に帰せられるらしい。最近グレーンの3分周期の振動は光球 (対流層) から彩層に周期的に伝播する擾乱その

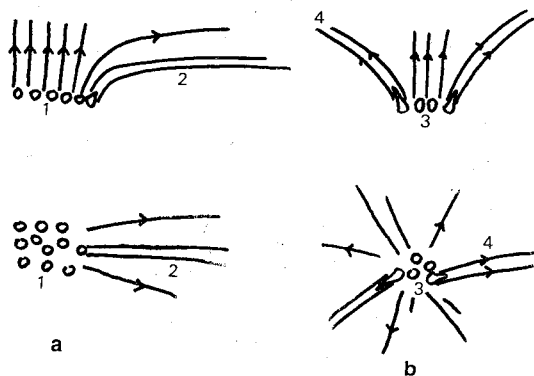


図5 プラージュ (a) と静かな領域 (b) の磁場の構造

上: 側面図 下: 俯瞰図

- 1 プラージュ 2 ファイブリン
- 3 ブラジェット (明るいモトル)
- 4 スピキュール (暗いモトル)